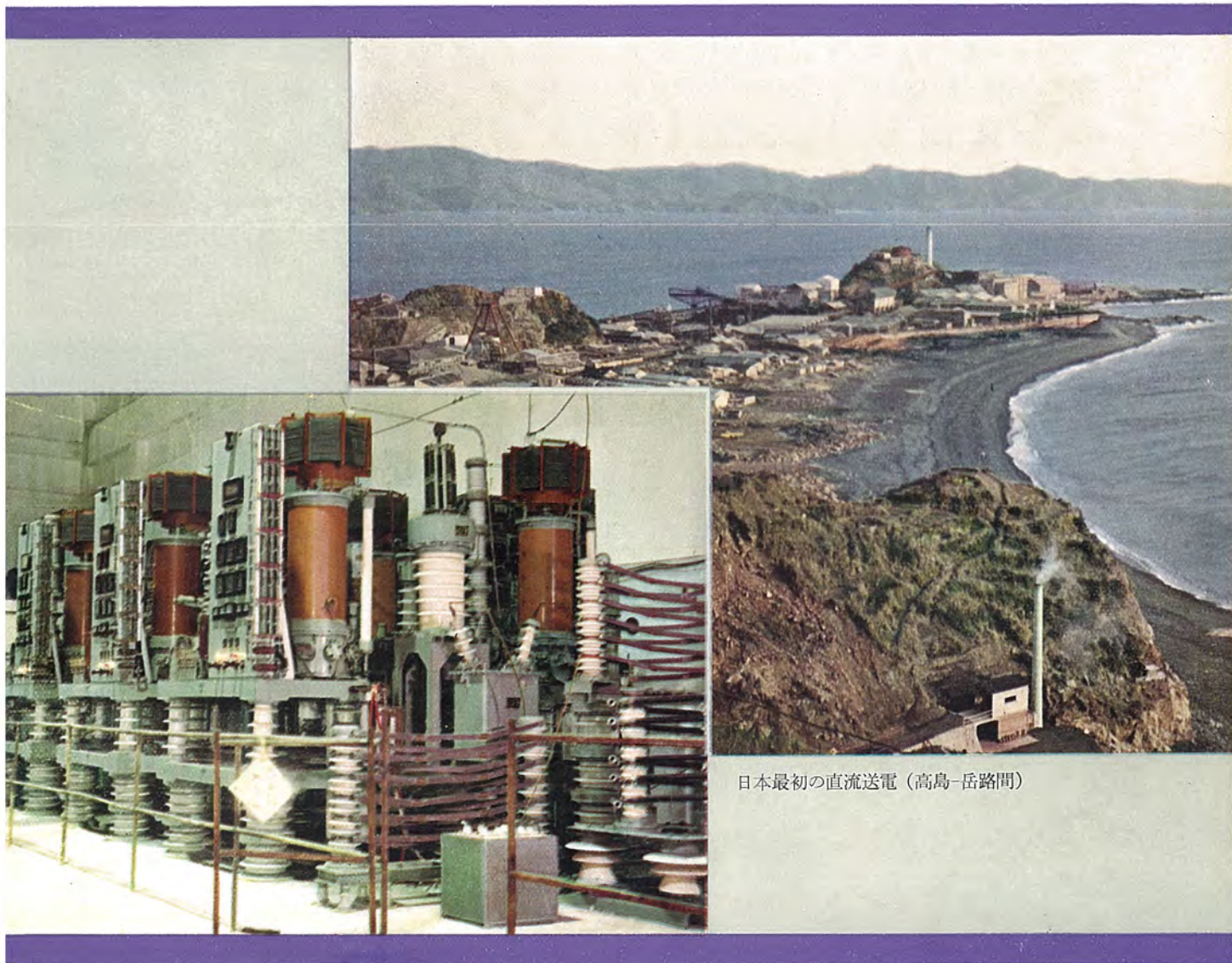


MITSUBISHI DENKI

三菱電機

電力技術特集



日本最初の直流送電（高島-岳路間）

8 臨時増刊

VOL 32 1958



MITSUBISHI DENKI

三菱電機

表紙説明

長崎港外にある三菱鉱業高島と九州本土対岸の岳路とを結ぶ海底約5kmの直流送電が計画され、昭和28年以降試作研究が行われて来たが、去る3月18日16時26分に、処女送電に成功し、小規模ながらわが国最初の直流送電として輝かしい第一歩を印した。

写真上部は、高島より対岸九州本土(岳路)を望む直流送電実施場所を示す。

下部は高島双子変電所に設置された高圧整流装置である。

なお高圧イグナイトロンのおもな仕様は次のとおりである。

直流電圧	60~50 kV
直流電流	150 A
出力	7,500 kW
タンク数	6
相数	六相
周波数	60/50 サイクル
冷却方式	油冷循環
回路方式	三相全波回路

三菱電機株式会社

本社 東京都千代田区丸の内(東京ビル)
(電) 和田倉(20)代表 1631・2331

研究所 兵庫県尼崎市南清水
神戸製作所 神戸市兵庫区和田崎町
名古屋製作所 名古屋市東区矢田町
伊丹製作所 兵庫県尼崎市南清水
長崎製作所 長崎市平戸小屋町
無線機製作所 兵庫県尼崎市南清水
大船工場 神奈川縣鎌倉市大船
世田谷工場 東京都世田谷区池尻町
郡山工場 福島県郡山市宇境橋町
姫路工場 兵庫県姫路市千代田町
福山工場 福山市沖野上町
中津川工場 岐阜県中津川市駒場
和歌山工場 和歌山市岡町
福岡工場 福岡市今宿青木
静岡工場 静岡市小島 110
家庭電器工場 名古屋市東区矢田町
無線機製作所 東京都世田谷区池尻町
東京工場 札幌市北二条東 12
札幌修理工場 札幌市北区堂島北町8番地1
大阪営業所 (電) 大阪(34)代表 5251
名古屋営業所 名古屋市中区広小路通
(電) 本局(23)代表 6231
福岡営業所 福岡市渡辺通り2丁目(電気ビル内)(電)福岡(2)代表6031
札幌営業所 札幌市大通り西1丁目(大通ビル)(電)札幌(2)代表 7236
仙台営業所 仙台市東一番丁 63
(電) 仙台(2)代表 6101
富山営業所 富山市安住町23の2
(電) 富山 4692・5273・2550
広島営業所 広島市袋町6(富国生命ビル)
(電) 中(2) 2211
高松営業所 高松市寿町1丁目(第一生命ビル)(電)高松 3178・3250
小倉出張所 小倉市京町10丁目(五十鈴ビル)(電)小倉(5) 8234

昭和33年第32巻第8号臨時増刊

電力技術特集 目次

巻頭言	常務取締役 山口良哉	3
避雷器の有効なる適用	荒井 潔	4
交流遮断器の遮断容量不足の対策	浅井徳次郎	11
安定度問題	安藤安二・馬場準一	14
電気機器の防食問題	中野光雄	22
原子力発電所をわが国の電力系統に導入する場合の諸問題	木村久男	28
第7回「電力賞」受賞	木村久男	38
軸電流の推定	中村芳雄	39
台湾電力における技術的諸問題	木村久男・山田栄一・迎 久雄	43
直流送電	木村久男	52
発電機の接地方式	山田栄一	61
富士製鉄室蘭製鉄所における絶縁試験	中野 勇・永井一男・中村芳雄・山田栄一・西村鉄治・大町久次・米野俊彦・原 仁吾・川上 剛・影山 隆	68

技術解説

火力発電シリーズ：変圧器(変圧器定格、変圧器の形式、冷却方式)	87
---------------------------------	----

原子力情報

SHIPPINGボート原子力発電所	渡辺泰男・渡辺信三・川口 修	90
-------------------	----------------	----

W社文献抄訳

原子力発電所の機器・46 kV リクローザ・世界でもっとも純粋なシリコン・ダイニスタ・タービン発電機の単機出力増加さる・配電用変圧器の耐熱性増強	111
--	-----

ニュースフラッシュ

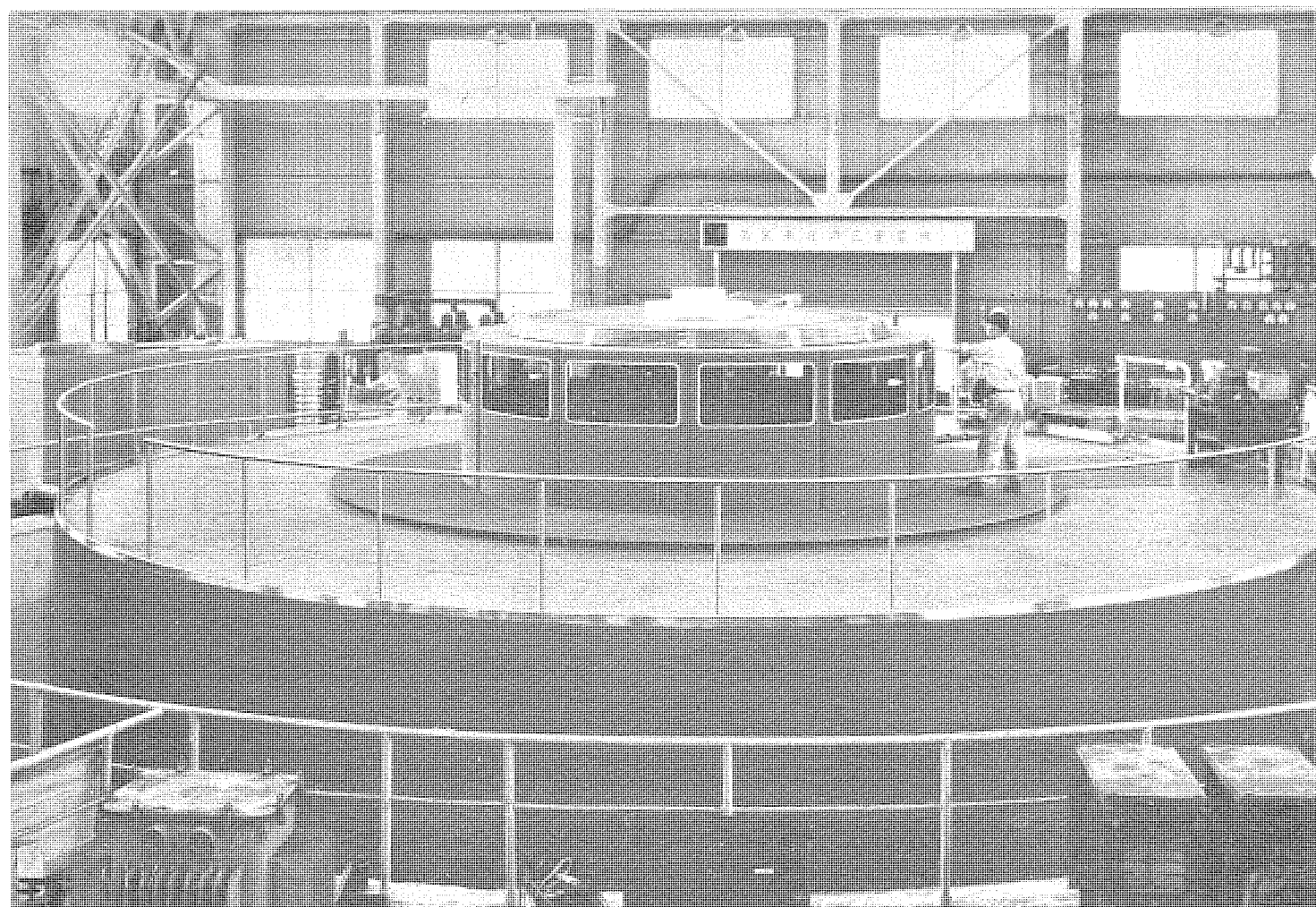
耐塩害用の絶縁階級 200 号 OT 形油入密封式コンデンサブッシング完成、住友電工向電力ケーブル耐圧試験設備完成、4,500 馬力 6 組の圧延電動機駆動用イグナイトロン整流器完成す、60 W FK 形小形直流電動機、近畿日本鉄道新鋭特急車「ビスタ・カー」完成	113
---	-----

特許と新案

(特) 直流送電装置(特) 直流送電装置におけるインバータ遮断方式	116
-----------------------------------	-----

最近における当社の社外講演一覧	21, 51
-----------------	--------

次号予定	110
------	-----



田子倉発電所向水車発電機

わが国最大容量をほこる電源開発株式会社田子倉発電所向 105,000 kVA かさ形水車発電機はこのほど工場組立を終え、電発関係者立会のうえ全試験を無事終了した。本機の定格は下記のとおりである。

発電機 かさ形回転界磁閉鎖風道循環形（空気冷却器付）

105,000 kVA 13,200 V 4,600 A 三相 50 c/s
176 rpm 36 極 力率 90%

主励磁機 立軸開放保護形

500 kW 440 V 1,135 A 16 極 他励

副励磁機 立軸開放保護形

20 kW 110 V 182 A 10 極 分巻

電気ガバナ電源用永久磁石発電機

500 VA 110 V 36 極

自動電圧調整器 磁気増巾器形

本機の大きい特色はつぎのとおりである。

- (1) わが国における記録品であるとともに世界的にみても屈指の大容量機である。
- (2) 典型的なかさ形機で振止軸受は推力軸受とともに同一油槽内に納め回転子下部に設置している。
- (3) 固定子コイルはダイヤラスチック絶縁を施した B 種絶縁でローベル転位を採用した 1 ターンコイルで

ある。

- (4) 推力軸受はミッチェル形で、特殊な平衡梁を用いた四線支持により扇形片上の圧力分布を均等にするとともに、おのおのにかかる負荷の配分状況を測定できるようにしている。

工場において発電機、励磁機、特性試験、絶縁耐力試験、等価温度上昇試験、自動電圧調整器の特性試験などの全試験を行い、きわめて優秀な成績を納めることができた。成績の一端を示すとつぎのとおりである。

発電機能率 力率 100%にて 98.3%(保証値 98.1%)

力率 90%にて 98.0%(" 97.8%)

短絡比 1.24 (" 1.1)

はずみ車効果 15,500 t-m²(" 13,600 t-m²)

等価温度上昇試験 固定子コイル 約 46°C

回転子コイル 約 40°C

励磁機 速応比 5.9 (保証値 4.0)

頂上電圧 1,160 V (" 1,100 V)

最大電圧上昇率 2,190 V/s (" 2,000 V/s)



巻 頭 言

常務取締役 山 口 良 哉

技術の進歩発展につれて、その関連する範囲は、いよいよ複雑多岐となり、いわゆる総合技術的性格を要請されることは当然の成行きと思われまゝ。機械と電気とが密接な関連を持ち、強電と弱電とが緊密な協調を保つことが必要となってきました。あらゆる関連分野の技術を総合的に組み合わせることによって、個々の機器はその機能を十分に発揮することができるのであります。数万馬力の電動機も、プロペラ側との技術的結合、エレクトロニクスを含めた、精密制御方式による速度調整などにより、初めて風洞用電動機としての機能を発揮することが可能となるのであります。原子力工業のごときは、もっとも広範囲な技術分野にわたってのもっとも見事な協調の成果と申すべきものと思われまゝ。

電力技術においても範囲の大小、程度の深浅こそあれ、例外ではあり得ないのであります。発電・送電・配電に関する、あらゆる技術の総合の上に立って、初めて個々の機器の、たとえば発電機・変圧器・遮断器・電動機などの機能が発揮でき

るのであります。換言すれば、これらの総合技術の裏付けなしには個々の機器の設計製作は、画竜点睛を欠くものとなりましよう。

当社では、従来個々の機器の設計製作に際し、総合的にかつ实际的に正しい性能を発揮しうるよう、使用者の立場に立っての総合技術を機器の設計製作に反映しうるよう、あらゆる努力を傾注してきました。個々の機器の設計者が不断にこの線に沿っての知識の向上と技術の練磨とに努力を尽していることはもちろんであります。顧客あるいは使用現場ともっとも緊密な関連を有する、応用技術部課長の制度を設け、本社営業部の所管とし、本社ならびに地方営業所に駐在せしめて、不断に使用現場との技術的連絡を保たしめております。資料の調査、実地試験における諸種のデータの実測、研究討論、および随時各地区において開催しております需要家との『技術懇話会』などあらゆる機会を利用して相互の技術の向上を図るとともに、実際使用者の立場に立っての諸種の技術的問題を個々の機器製作担当者である製作工場の技術者へ伝達し、設計製作の上に反映せしめるよう努力いたしております。

この応用技術部課長の制度は、電力技術のほか、電機技術、機械技術、照明技術など応用別に設けられ、個々の技術部門において総合技術あるいは応用技術的役割を果たすとともに、随時必要に応じて各応用別技術部課長間の意見の交換をはかり、いっそう高度の総合効果を上げるよう運営されております。さらには別途に設けられたサービス部課長の制度をも、顧客の要求希望を探るための触角として利用しうるよう総合的運営が行われております。

さきに『三菱電機』昭和32年第31巻第4号臨時増刊として、電力技術特集を発刊し、電力技術部課長の活動の一端を紹介して大方各位からのご好評をいただいたのでありますが、今回ここにその続編を刊行して、お届けする機会を得ましたことは喜びに堪えないところであります。この企画は今後も機会を得て続けて参りたいと思ひますが、この企画が幸にして幾分たりともかねてわれわれが念願とする技術奉仕の目的に添うことを得ますならばこの上もない幸と思ふのであります。

避雷器の有効なる適用

本 社 荒 井 潔*

Effective Application of Lightning Arresters

Head Office Kiyoshi ARAI

Problems on the protection against lightning hazard and on lightning arresters have been the subject of study for a long time by engineers and learned men. A number of phenomena made clear in this respect help promote the technique of lightning protection. In the construction of lightning arresters, their forms and trend have been determined as well as the establishment of insulation coordination in electric power systems. Use of lightning arresters under the present status of the development is sure to achieve successful results to a considerable extent if effective application is made in a logical manner, bringing about reliable protection.

1. ま え が き

避雷および避雷器の問題はかなり古い時代から研究されているところであって、多年にわたりかつ多数の学者実地家により調査・実測が行われまた避雷器の製作も各様多種に及んでいるのである。したがってその間雷現象についても次第に解明され同時に避雷保護の面においても著しい業績があがってきているのである。

たとえば米国 Boulder 287 kV 送電線における雷観測⁽¹⁾、わが国における発送電雷害防止委員会における成果⁽²⁾など、また現象の解明にも古くは Empire State Building における観測⁽³⁾があり雷撃の極性の問題、ストリーマの放電形式などに関して次々⁽⁴⁾⁽⁵⁾と発表が行われている。

避雷器構造については電力系統の絶縁協調の基準が確立したことから、その形態、動向が定まってきた。すなわち電圧階級、放電耐電、継続時間および動作責務の規格が実情に即するものとして決定されるに伴い、これに適合する放電特性を有するものが開発されさらに実用に便にかつ経済性を有するものを実現してきているのである。

このように進展を見た現在の段階において避雷および避雷器の使用は、これの有効なる適用が行われれば相当程度の成績をあげることができ、電気機器の絶縁の保護が強化されることになるのである。

以下に「有効なる適用」に関し、若干の記述を試みる。

ただし避雷および避雷器の問題は単なる外雷だけを対象とせずいわゆる内雷といわれる異常電圧現象保護をも考えるべきである。この場合電力系統すなわち送配電系統、機器現場の施設などに大いに関係がある。すなわち架空地線などの遮蔽、中性点の接地方式、放電間隙の適用およびサージアブソーバまたは放出保護筒の使用さらに再閉路方式の採否などに深い関係がある。これが最善に施設されることがもとより適当であり、望ましいのである。

2. 避雷器の選定

現在避雷器の最終的形式として一般に用いられているものは弁形避雷器である。しかしここにいう避雷器はもちろん JEC 131 (1954) の避雷器規格に適合するものであるが、規格にいう「電気施設に襲来する雷による衝撃過電圧」に対するだけでなく、もう少し一般的にいわれる内雷をも考えて見ることとする。

この場合避雷器は適当な値で放電を開始し、このことにより機器の衝撃電圧を制限するもので、同時に自身は続流を通ずることなくしかもこの動作の反復責務に耐えることが必要であるのである。

2.1 適用避雷器の定格電圧

避雷器の定格電圧はわが国では普通これを使用する電力系統の公称電圧⁽⁶⁾で代表されている。そうしてこの公称電圧による避雷器の特性はそれぞれ系統の基準衝撃絶縁強度を根拠として定められるものであって、その値はこの避雷器の制限電圧が保護機器の衝撃絶縁耐力より十分低く適当な裕度のものとなっているのである。

したがって回路の公称電圧を知れば避雷器の公称電圧すなわち定格電圧は決定できるわけである。しかし避雷器にかかる系統の電圧は種々な理由で過電圧になることがある。すなわち系統の事故、発電機の過速度、開閉サージ、系統の電圧変動、変圧器励磁リアクタンスおよび線路キャパシタンスの遮断その他もろもろの原因によるものである。

これらの異常電圧は当然その発生の原因が糺されるべきものであるが、避雷器がもしこのような異常電圧によって放電を開始した場合、時に続流遮断を失敗した時に自身に損傷をうけることがある。

この場合商用周波許容端子電圧が考えられるが、これは一般には公称電圧の 1.4 倍が標準であって、これ以上のものについては別途に考慮しなければならない。しかし商用周波許容端子電圧を高めることは製作上不可能ではないが経済的に高価となるのは不得止のものである。

避雷器定格電圧はこれを低く選ぶことができれば有利である。したがって異常電圧はその原因を極力なくするようにすべきで、戦後わが国において系統施設の改善が数多く行われた。

系統の中性点が適当に接地されている場合は避雷器はある低減した値をとることができる、中性点接地方式と避雷器との間にはつぎの関係があると AIEE の委員会から報告⁽⁷⁾されている。

表 2.1

推奨される最小避雷器定格 kV				
系統相間電圧 kV		A 系統*	B 系統**	C 系統***
定 常	最 大	75% 避雷器†	80% 避雷器†	100% 避雷器†
12	13.2		12	15
23	25		20	25
34.5	37		30	37
69	73		60	73
92	97		80	97
115	121	90	97	121
161	169	121	145	169
230	242	182	195	242
330	347	264	276	

注 1. * A 系統=きわめて有効に接地された系統
たとえば変圧器の各バシクの中性点が直接々地されている。

** B 系統=有効に接地された系統
 $X_0/X_1=0\sim3$, $R_0/X_1=0\sim1$

*** C 系統=中性点(発電機, 変圧器)を抵抗で接地した場合
 $X_0/X_1=3\sim\infty$, $R_0/X_1=1\sim\infty$

† 故障中に健全相に予想される最大の相電圧と同じ。

注 2. この表では中性点単独または非接地の場合については値が示されていない。
適用は別に調査されることになる。

2.2 避雷器の放電々流

(1) 雷電流

雷電流の測定は古くから行われ種々の報告が出されている、わが国でも発送電雷害防止委員会などで実測が行われておりその報告によれば⁽²⁾、猪苗代新幹線で測定されたものに 138.1 kA の記録がある。

また米国における調査⁽⁸⁾によれば、高層建築・送電線鉄塔などに落ちた直撃雷電流は表 2.2 のとおりである。

同じ報告による発変電所用避雷器の雷電流放電データは表 2.3 のようである。

以上のデータからも知れるように発変電所において避雷器を通じて得られた電流値は送電線鉄塔や高層建築への直撃雷の雷電流値の大約 1/10 である。すなわち発変電所避雷器では最大は約 20,000 A と見られている。また電流波高値および上昇率に対する苛酷な値として 5,000 A および 5,000 A/ μ s が合理的の限界であると考えられている。

(2) 放電々流と制限電圧

放電々流と制限電圧との関係はいわゆる $v-i$ 曲線からきまるが、理想としては電流値の広い範囲において電圧が一定すなわち被保護機器に加わる異常電圧を一定に制限することがよいのである。

しかし実際問題として $v-i$ 曲線をフラット(図 2.1 (i))にすることも必ずしも容易でないし、また特性によっては(たとえば内雷処理のために長時間継続サージの放電耐量を要求される場合など)(図 2.1 (ii))のものが性能がすぐれている。

JEC-131 の規格には、これは長時間耐量を考慮に入れたものではないが、放電々流 1,500 A, 5,000 A の二つについて制限電圧がきめてある。しかもこれは印加サ

避雷器の有効なる適用・荒井

表 2.2 直撃雷電流のデータ

送電線導体上の架空地線に落ちた		累積百分率
雷撃電流 (A)	100,000	1.0%
	50,000	10.0
	20,000	50.0
	10,000	90.0
電流上昇率 (A/ μ s)	50,000	1.0%
	28,000	10.0
	8,500	50.0
	5,000	70.0
波 頭 長 (μ s)	2,500	90.0
	0.7(または以下)	1.0
	2.5	50.0
半波尾長 (μ s)	5.5	90.0
	120	1.0
	81	50.0
半波尾長 (μ s)	39	90.0

註 原資料にはいずれも曲線が示されている。

表 2.3 発変電所用避雷器雷放電々流

接続場所	放電々流 (A)	波頭長 (μ s)	半波尾長 (μ s)	累積百分率 (%)
田舎の非遮蔽送電線	30,000 またはそれ以上			0.5
	18,000			1.0
	4,000	"		10.0
	600	"		50.0
	200	"		90.0
	"			
発変電所遮蔽線	12,000 またはそれ以上			0.5
	9,000			1.0
	5,000	"		5.0
	3,000	"		10.0
	500	"		50.0
	300	"		90.0
	"			
		0.5 またはそれ以下		1.0
		0.8		10.0
		2.0	"	50.0
		5.5	"	90.0
		"		
			110	1.0
			60	10.0
			26	50.0
			6	90.0

註 原資料にはいずれも曲線が示されている。

ージを一定の波形 [(2~12) × (15~25)] によるものとした試験結果についていうものである。衝撃電流の波形、上昇率が変れば結果も変わってくるのである。

(3) 放電々流の考え方

避雷器の放電々流の考え方については絶縁協調に基づく

制限電圧といっしょに考え合わせなければならない。

制限電圧は重要な要素でこの値が被保護機器の基準衝撃絶縁耐圧以下でなければならないことは当然である。ただし制限電圧は放電々流の大きさ、波形およびその上昇率によって違うこ

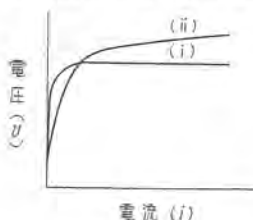


図 2.1 $v-i$ 特性曲線

Fig. 2.1 $v-i$ Characteristic curve.

とは注意を要する。 $v-i$ 特性曲線において放電耐量を大とするに従って電圧曲線はフラットからやや高い値をとることが考えられる。

しかしこのことについてはつぎのようにいわれている。すなわち米国の資料⁽⁷⁾によれば“最近の弁形避雷器の非直線抵抗の性質によって著しく減少される。たとえば電流値が 5,000 A から 20,000 A に 400%に変化すると制限電圧は 25%増加する”と発表されている。しかして $v-i$ 特性曲線をフラットに出すことは理由はあるが、他の特性も満足する総合的な判断によって避雷器の使用を定めるべきである。

2.3 その他避雷器の特性

(1) 放電開始電圧

——衝撃電圧放電開始と商用周波放電開始

衝撃放電開始電圧と制限電圧との間にはもちろん密接な関係がありその数値に対しては規定に示されるとおりであるが、両者の関係だけでいえば現在の製造技術においては問題になる点はない。

ただ衝撃電圧放電開始と商用周波数放電開始について考えるべき点がある。この二者の関係は普通衝撃比 (I. R.=Impulse Ratio) といわれて取り扱われている。

元来放電開始電圧とは衝撃放電開始、中間周波放電開始の基準となるものでかつ商用周波放電開始、商用周波耐圧、商用周波許容端子電圧ならびに系統の電圧状態に耐える能力を示すものである。したがって衝撃比は前者と後者との限界を示すものと考えることができる。

放電を開始する避雷器直列ギャップは現在の多間隙構造において電位分布を一様にするにより I. R.=1 とすることができるが、またギャップ部分のシールドの方法などによって I. R. に他の値をとらすこともできる。

数年前には統流遮断能力の関係で商用周波数放電開始電圧は高いほどよい。すなわち I. R. を 1 以下としたものが良いという説が主張されたこともあった。

このことは衝撃比を 1 以下とする特性を維持することに問題があり⁽⁷⁾、かつ現在の中間周波放電開始を扱うに及んで商用周波放電を高くとることの困難から、今日では全く不適当なものとしてされるに至っている。

商用周波放電開始電圧は新式の避雷器については高くとすることはできない。しかも統流遮断能力ないしはギャップの消弧能力の高いことが要求される。このためにギャップ部における磁気吹消などの消弧増進手段がとられている。

図 2.2 (b) はわが社における SV-W 形の磁気消弧ギャップの構造を示すものである。

商用周波放電開始について別の問題で、避雷器磁気ケーシング表面の汚損、塩分付着などのいわゆるコンタミネーションの問題および特殊気象条件のため電圧値が低下するというやっかいな問題がある。このことの対策処理については別に発表⁽¹⁰⁾しているが、一方他の被保護機器の絶縁も低下することを考えると、避雷器の放電開始を一定不変に保つということにも疑問はあるのである。

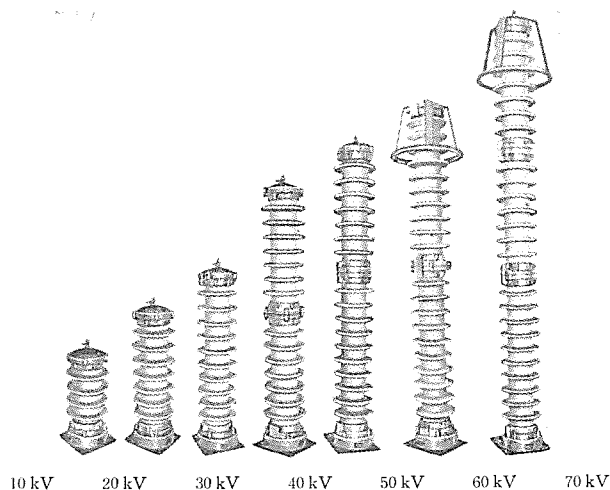


図 2.2 (a) SV-W₂ 形オートバルブ避雷器の一例

Fig. 2.2 (a) Type SV-W₂ autovalve arresters.

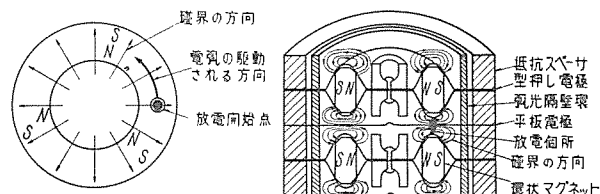


図 2.2 (b) マグネット入りギャップのアーキ駆動

Fig. 2.2 (b) Arc repulsion of gaps with magnets.

マグネット入りギャップの内部構造
Interior construction of gaps with magnets.

また系統の異常電圧の高いところの多いわが国では許容端子電圧の裕度をもたせることは望ましく、そのためには商用周波放電開始電圧の値には別の考慮があるであろう。

(2) 商用周波許容端子電圧

許容端子電圧については前条および前項にもふれているところであるが、わが国の 1.4 E は諸外国の 1.2 E の規格から見ても相当高いのである。

ここで問題になるのは異常電圧の発生の高いことの見込まれる系統の場合における避雷器の適用であって、この場合許容端子電圧をさらに高くとるかどうかがであるが不得止の場合もあるであろうと思われる。

また経年使用の系統において機器の絶縁が低下している場合、制限電圧の低減を要求するとすれば、これによって許容端子電圧との関連を悪くし統流遮断能力を低下させるかも知れないので、この場合には注意を要するのである。

(3) 放電耐量

放電耐量は衝撃波において 100,000 A の避雷器を製作することは可能である。ただ送電線および発電所への直撃雷を避けることは可能であって、避雷器にとってきわめて有効である。

送電線全長にわたる遮蔽が施される場合、長年月間有効に働きその能率は 95~98%といわれている。

このような遮蔽は架空地線、保護筒その他のものによるのであるが、適当に施設される時は直撃を遮断すると

ともに大地への幾つかの放電路を形成して雷電流を放電する。また並列路であるから回路のインピーダンスを減少して結果的に電圧を降下させる。かくて避雷器の放電耐量に大きく裕度を与える結果となる。

発電所への直撃もその確率は少ないといわれるが、同様な方法で遮蔽ができる。すなわち発電所から約 1 マイルの地点まで送電線に架空地線を設ける。また発電所屋外設備の鉄構上に十分高く地線を張って保護網を設ける。この場合垂直線から $30\sim 45^\circ$ の円錐形が Cone of protection といわれている。

架空地線の有効なことは W. W. Lewis も述べている⁽¹¹⁾とある。

放電耐量については開閉サージのようないわゆる長波尾長中間周波放電を可能ならしめる耐量をも必要とする。これに対しては衝撃大電流に耐えらるとともに 2 ms, 400 A の放電は可能である。

3. 避雷器の施設

3.1 被保護機器との間隔

避雷器の施設は避雷器の選定とともに重要なことである。施設によって避雷器がその性能を十分に発揮することに支障があってはならない。

避雷器と被保護機器との関係は単に全波絶縁協調だけの考えでは不十分で、その施設される間隔に重大な関係がある。このことについて、いくつかの計算やら実測が行われている⁽⁷⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

避雷器と機器との間隔を考える場合、まずその施設される回路の構成を知らなければならない。実際現場においての回路構成はきわめて多岐であって進入波の伝播する状態はそれぞれ異なるのである。したがって一般的な解決を求めることは困難で、正確には個々にわたって検討されるべきものである。

ただし変圧器について代表的な回路を考えればそれが回路の終端にあるかあるいは中間位置にあるかの二つとなろう。すなわち単独の架空線が変圧器に至り終端となるようなものおよび進入過電圧サージが他の回線を伝って出て行くような構成をなすものの二つが代表と考えられる。

(1) 回路 (1)

図 3.1 のような回路につき計算されたものの一例⁽¹²⁾では 140 kV 級につき表 3.1 のような数値が発表されている。

この計算に当っては進入サージの波形は

$$e = E(1 - e^{-\alpha t_0})$$

とされており、波頭峻度は $\alpha = 0.2$ の時 200 kV/ μ s となるごとく設定されている。また E は 1,000 kV, 変圧器衝撃絶縁強度は 750 kV とされている。

別の資料⁽⁷⁾によれば、定常系統電圧 161 kV 回路につき表 3.2 において避雷器は T 接続すなわち母線から変圧器までの回線から接続線が避雷器に延長されているものとなっている。また発電所は遮蔽されているものとし

避雷器の有効なる適用・荒井

進行波だけが変圧器に達する。避雷器電流は絶縁レベルと線路の 450 Ω サージインピーダンスによって制限される。ただしサージの最大上昇率は 500 kV/ μ s となっている。

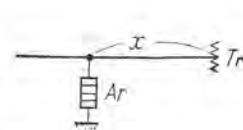


図 3.1 回路 (1)

Fig. 3.1 Circuit (1).

表 3.1 避雷器の許容間隔 (電力中央研究所)

	指数関数波進入					備 考
	$\alpha=0.2$	$\alpha=0.3$	$\alpha=0.4$	$\alpha=0.5$	$\alpha=1.0$	
$x(m)$	90	60	45	36	—	変圧器を解放端とみなす
	90	59	44	35	—	変圧器の静電重量を考える

表 3.2 避雷器の許容間隔 (AIEE Com. Report)

電圧 (kV)	線路構造 木柱 鉄構	線路絶縁 (kV)	変圧器 BIL (kV)	避雷器定格 (kV)	間 隔 x (ft)
161	×	1,490	650	145	105
161	×	1,020	650	145	140
161	×	1,490	750	169	125
161	×	1,020	750	169	165

(2) 回路 (2)

前述の“進入サージが他の回路を伝わって出る”構成となるものの例として図 3.2 に従って計算されたもの⁽¹²⁾はつぎのようである。この場合計算の基礎となった記号、数値は前項の場合と同様である。

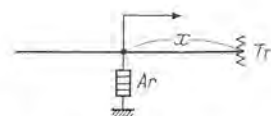


図 3.2 回路 (2)

Fig. 3.2 Circuit (2).

表 3.3 避雷器許容間隔(回路(2)) (電力中央研究所)

	指数関数波進入					備 考
	$\alpha=0.2$	$\alpha=0.3$	$\alpha=0.4$	$\alpha=0.5$	$\alpha=1.0$	
$x(m)$	489	326	245	196	98	解放端と見る

(3) 実際問題

以上に紹介したものは、無数多様な回路のうちの最も簡単な例につき特定の電圧階級で計算を行ったもので、実際問題を扱う場合にはそれぞれの回路の条件に従ってかかる調査が行われなければならないのである。結果の値に一定の関係が見出しにくいからである。

ただし回路 (1) のようにすなわち一回線送電線だけの終端発電所が一番苛酷な条件にあること、回路 (2) のように二回路以上の存在する場合には相当間隔を延ばし得ることなどは確かである。

避雷器配置と被保護機器との間隔については、回路の条件が複雑なのでまだいまでは総括的にいうことはむずかしい。やはり個々の調査にまつ必要がある。ただしコンピュータを利用することにより現在ではこのことに困難はない。

また避雷器の保護効果を直接発揮させるには機器の端子に避雷器を設置するのが最も望ましい。図 3.3 はこの

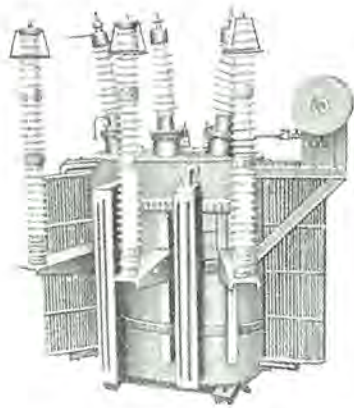


図 3.3 変圧器端子の設置された避雷器

Fig. 3.3 Arrester provided at transformer terminal

例を示すものである。

3.2 避雷器接続線と接地

避雷器を回路に接続する時その導線長をできるだけ短くかつ電流容量を十分とるべきことは当然である。接続線のインダクタンスを L とした場合、接続線に $L \cdot di/dt$ の電圧降下が生じ、これが避雷器の制限電圧に加わる。

同様避雷器と接地との間の電圧降下も制限電圧に影響する。このことは避雷器に大量の放電電流が流通した時に顕著になる。

避雷器の導線降下の計算はつぎのように決定できる。

$$L \frac{di}{dt} = \frac{2L \cdot de/dt}{Z}$$

ここに

$$\frac{di}{dt} = \text{電流の上昇率 } \text{kA}/\mu\text{s}$$

$$\frac{de}{dt} = \text{進入サージの上昇 } \text{kV}/\mu\text{s}$$

$$Z = \text{線路のサージインピーダンス } \Omega$$

$$L = \text{導線のインダクタンス } \mu\text{H}$$

この計算は $de/dt = 200 \sim 500 \text{ kV}/\mu\text{s}$, $Z = 500 \Omega$, $L =$ 単位 $\mu\text{H} \times$ 長さなどによって計算できる。

発電所の接地抵抗は無視できるほど小さいものでなければならない。そのためには直接々地を行って接地抵抗を低下させる。

大発電所では低抵抗の広い接地網を備えるべきで、機器その他の施設と避雷器接地との間に大地電位差を生じないようにすることがよい。

埋設地線についてはその影響は小さい。或る例⁽¹⁴⁾によれば避雷器と変圧器との間隔を 200 ft とし、避雷器の接地側と変圧器タンクを 167Ω のサージインピーダンスの 200 ft の単一埋設導体で接続した場合、変圧器にかかる電圧に対する影響は表 3.4 のようであるとしている。

ここに

$$F = \frac{\text{避雷器の最大サージ電圧}}{\text{進入サージ上昇率}} = \frac{E_s}{de/dt} \text{ (単位時間)}$$

$$C = \text{変圧器の等価容量 } (\mu\text{F})$$

E_r = 変圧器における電圧の最大変化

E_s = 避雷器

表 3.4 変圧器電圧に対する埋設地線の影響

F (μs)	C (μF)	E_r/E_s	
		埋設地線無視	埋設地線を含む
0.8	0	1.46	1.46
	0.0008	1.63	1.68
	0.0032	1.72	1.80
1.2	0	1.28	1.28
	0.0012	1.46	1.50
	0.0048	1.54	1.60

避雷器の接地抵抗はできるだけ小さい方がよいのであるが、普通測定されている商用周波ないし直流弱電流による抵抗値と衝撃電流に対する接地抵抗とは等しいものではなく、つぎの関係があるといわれている⁽¹⁵⁾。

$$\frac{R}{R_0} = \frac{1}{1 + A \left(\frac{I \rho}{2 \pi r l} \right)^B} = \delta = \text{アース抵抗の低減率}$$

R = 衝撃アース抵抗 (Ω)

R_0 = 定常アース抵抗 (Ω)

I = 衝撃電流 (kA)

l = アース電極の長さ (cm)

r = " 直径 (cm)

ρ = 土壌の固有抵抗 ($\text{k}\Omega \text{ cm}$)

A, B …… 定数 ($A = 10 \sim 30$, $B = 0.74 \sim 0.86$)

以上によれば衝撃大電流に対しては低減効果は相当大で、たとえば鉄塔のアースのような低抵抗の得がたい場合などの接地施設にとって大いに参考になろう。

避雷器の接続線については上に記したような要項に準じて施設される。

接続線の実際について参考までに当社の避雷器標準接続端子一覧表をつぎに掲げる (表 3.5)。

表 3.5 オートバルブ避雷器標準接続端子一覧

避雷器	公称電圧 (kV)	接 続 端 子 (mm ²)	
		線 路 側	接 地 側
線 路 用	3	導線付	接地線 (14 mm ²) 付
	6	"	"
	10	10	"
	20	10	"
	30	10	21
発 電 所 用	3	10	16.8
	6	10	16.8
	10	10	21
	20	10	21
	30	10	21
	60	13.6	21
	70	16.8	21
	100	16.8	21
	140	16.8	21

4. 特殊回路と避雷器

特殊な回路に避雷器を施設する時にはさらに別な考慮が払われなければならない。

特殊回路として考慮されなければならないものはケーブルおよびケーブルに接続された機器の回路、低減絶縁

の機器保護、直接配電回路、高異常電圧回路などであろう。

以上のうちケーブルおよびケーブルに接続された機器回路に対する保護はとくに重要であるので以下に取り上げて見る。

4.1 ケーブルに接続された機器回路の保護

架空線回路の場合機器の保護に対して避雷器は機器にできるだけ近接した位置に設けられるべきことは前述のとおりであるが、ケーブルが使用されている場合には事情を異にする。

(1) 進入サージに対する施設保護

普通のブラクテスとしてケーブルが施設されている場合、進入衝撃(外雷)に対してケーブルと架空線の接続点に避雷器を置く。

この場合接続点における最大許容電圧がアナログ・コンピュータによって求められている⁽¹⁶⁾。その結果を示せば図6(a)(b)のとおりである。

このコンピュータにかけられた回路は最も簡単なもので、すなわち1本の架空線から1本の単心鉛被ケーブルにつながれたもので遮断器または変圧器に終る場合に限っているのである。したがって複数の回路が母線につながれている場合にはずっと平なものになる。

この場合ケーブルへの流入サージの電流上昇率は4,000 A/ μ sとし、避雷器電流は10,000 Aとしてある。またサージの波頭は0.4 μ sとし4,000 A/ μ s流入の時接続点の電圧上昇率最大となっている。

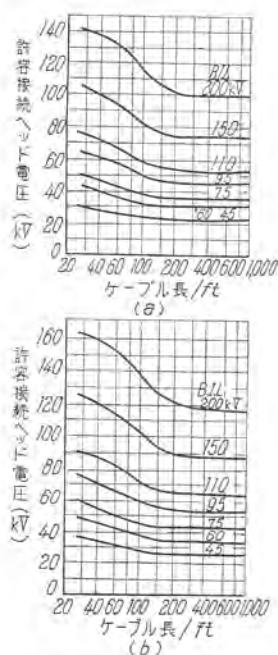


図 4.1 ケーブル接続点における最大許容電圧
(a) スイッチギヤ類、乾式変圧器他
(b) 油入変圧器

Fig. 4.1 Maximum permissible voltage of cable junctions.

図の曲線から避雷器の放電電圧など避雷器特性との関連がわかることになる。

この避雷器の接地端子はケーブルの金属シース、ケーブル終端箱(ヘッド)と接続して接地されることはもちろんである。

(2) 内部異常電圧に対する施設保護

ケーブル系統に発生する異常電圧には、前述の外雷すなわち架空線からの直撃雷あるいは誘導雷によるもののほか、ケーブル系統内における回路の開閉および不平衡事故などによる内部異常電圧——内雷がある。

内雷に対する機器の保護には根本的には異常電圧発生の原因を探り、系統施設を改善して対処すべきであるがやはり避雷器が用いられることになる。

しかして内部異常電圧は日本および外国で実測され

あるいは試験された結果からいって普通考えられる施設および条件の範囲では、常規対地電圧波高値に対して最高4~5倍と報告されている⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。(回路の中性点が適当に接地されている場合にはこの値は相当低くなる)またその接続時間は200~2,000 μ s位といわれている。

内雷用避雷器についてその性能に具備すべき条件としてつぎのようなものが一般に期待されている。

イ、機器およびケーブル自体の絶縁強度以上に十分な裕度をもつ制限電圧特性を有すること

ロ、長時間放電耐量を有し、苛酷な動作責務に耐えること

このような性能を有するものとして内雷用避雷器の仕様の一例はつぎのようである。これは中部電力、ケーブル系統委員会において提示されているものである。しかしこれは公称電圧30 kVのものにつき示されたものである。

内雷用避雷器仕様(例)

- イ、公称電圧……………30 kV (E)
- ロ、商用周波許容端子電圧…36 kV (1.2 E)
- ハ、商用周波放電開始電圧…70 kV 以上
- ニ、中間周波放電開始電圧…120 kV 以下 (10~500 μ sにおいて) (常規対地電圧 $\times 4.5$ (約))
- ホ、衝撃放電開始電圧……………120 kV 以下
- ヘ、制限電圧……………120 kV 以下 (1,500 A)
- ト、放電耐量……………400 A, 2 ms

以上のうち中間周波放電開始電圧の値は120 kVときめられている。これは被保護機器の中間周波に対する絶縁耐力とともに考えられるべき数値であるが、中間周波の絶縁強度がBILの90%であるとすれば変圧器については180 kV(200 kV $\times 0.9$)で劣化を考慮しても160 kV程度ではないかと思われる。したがってこの数値についてはさらに検討が加えられなければならないものと思うのである。

(3) 内雷用避雷器の現地試験

内雷用避雷器の仕様を決定しあるいはその動作状況を調査する目的をもって、昭和29年3月に中部電力(三重SS)においてその動作責務試験が大々的に行われた。

この試験はケーブル回路において避雷器が動作することを模擬して、等価ケーブルに互長12 km, 24 km, 36 kmおよび12 km \times 三回線のものを用意し、これらに同極性ならびに逆極性の継続サージを印加して動作責務を調査したものである。

わが社から供試した避雷器はつぎの静特性を有するもので、その試験結果は表4.1に示すようである。またその代表的オシロを示せば図4.2のようである。

供試避雷器の特性

符 号	(A)	(B)
公称電圧 (kV _{rms})	7	7
許容端子電圧 (kV _{rms})	10	10
商用周波放電開始電圧	25.7	24
衝撃放電開始電圧	32	28.5
制限電圧 (3,000 A)	30.8	32

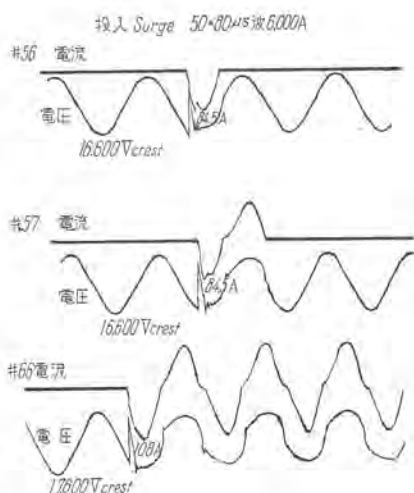


図 4.2 中電三重変電所における内雷用避雷器動作
責務試験

Fig. 4.2 Operation duty tests of arresters against
switching surges.

この試験には当社のほか計5社が参加した。その成績は別途報告⁽¹⁰⁾されているが、当社のものの成績はきわめて優秀で、内雷保護に十分役だつことが明瞭になった。この試験はきわめて大がかりのものであったが、結果は貢献するところ大である。

表 4.1 中部電力三重変電所における動作責務試験結果

避雷器 (符号)	オシロスコ 波	電 圧 (kV)	電 流 (A)	投入位相	放電時避雷器 端子電圧 波高値	結 果
(A)	5	14.7	—	+118°	1.5E	O.K.
	6	15.0	—	-84°	1.52E	"
	35	15.7	80以上	-45°	1.6E	焼流
(B)	23	11.9	67	-75°	1.2E	O.K.
	24	12.3	62.5	-84°	1.25E	"
	40	15.76	87	-58°	1.6E	"
	42	15.23	77	-59°	1.55E	"
	56	16.60	84.5	-60°	1.68E	"
	57	16.6	84.5	-76°	1.68E	"
	66	17.6	108	-48°	1.78E	焼流
	67	17.6	82	-48°	1.78E	"

5. む す び

避雷器の適用を考えるにあたりまず適当な性能のものを選ぶべきことは当然であるが、外国で実用されているように75%避雷器、80%避雷器などが使用できればこれは望ましいことである。しかしそのためには系統の中性点が有効に接地され異常電圧の発生が抑制されるよう構成されていなければならない。

また避雷器の特性で商用周波放電開電圧を高く選ぶことはその続流遮断能力の関係で性能が良好であるように考えられた。けれども中間周波放電を要求される今日商用周波放電を高くとすることは不可能または不適当となっ

ている。したがってこのような考えは改められなければならないのである。また放電耐量については外雷の遮蔽施設が望まれる。また長波尾長中間周波に対する耐量が考慮されなければならない。これらのことについては文中に若干記述したとおりである。

避雷器の施設については被保護機器との間隔、接続線と接地の問題などについて記述した。これらについては権威ありと思われる資料を引用した。

特殊回路への適用は主としてケーブル回路について記述した。ケーブル回路は進入サージにより特別の過渡現象を有しかつケーブル回路につながる機器はいわゆる内雷保護を最も必要とする。この項では内部用避雷器の一例として現地において実施された動作責務試験の結果を紹介した。

なお超高压用の避雷器は特殊回路用というべきものではなからうが、現在わが国の大電力単一輸送形式の送電系統から考えて、その性能にはつぎの機会に触れて見たいと思っている。

終りにあたり本文の文献収集に協力を得た当社伊丹製作所岡田技師に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) T. M. Blackeslee & E. L. Kanouse; AIEE Tech. Paper 50~30 (1950).
- (2) 発送電雷害防止委員会研究成果概要(昭27).
- (3) K. B. McEachron; AIEE Trans, 60 (1941).
- (4) J. H. Hagenguth & J. G. Anderson; AIEE Tech. Paper 52~175 (1952).
- (5) T. W. Liao & J. G. Anderson; AIEE T. P. 53~280 (1953).
- (6) 規格 JEC 131 (1954).
- (7) AIEE Committee Report, Power Apparatus and Systems AIEEE. Aug. 1957.
- (8) Preliminary Working Group Report of the AIEE Subcommittee; AIEE Miscel. Paper 51~285.
- (9) 木村: OHM 昭27. 7月(臨).
- (10) 荒井: 三菱電機 昭32. 4月(臨).
- (11) W. W. Lewis: The Protection of Transmission Systems against Lightning.
- (12) 電力中央研究所(広瀬, 柏木, 清水): 避雷器と被保護機器との距離について.
- (13) ASE 47 (1956), Etendue de la Zone Protection d'un Parafoudre. (避雷器の保護範囲—岡田昌治).
- (14) R. L. Witzke & T. J. Bliss: AIEE Tech. Paper 50~153.
- (15) 法貴, 鶴見: 電気工学論文集 II. 2. p. 124.
- (16) R. L. Witzke & T. J. Bliss: AIEE Tech. Paper 50~83.
- (17) 中部電力・ケーブル系統委員会・アレスタ小委員会答申書(昭32).
- (18) 都内ケーブル対策専門委員会: 都内20kVケーブル系統における諸問題(昭26).
- (19) 中部電力・ケーブル系統委員会: ケーブル回路用避雷器動作責務試験結果.

交流遮断器の遮断容量不足の対策

本社 浅井徳次郎*

Countermeasures for Insufficient Rupturing Capacity of A-C Circuit Breakers

Head Office Tokujirō ASAI

The failure of old circuit breakers is frequently reported, because they are subjected to interrupting duty beyond their original design. Various countermeasures are under consideration. The best method is to replace them with new equipment, but in consideration of economy the following plans are suggested: improvement of arc extinguish chambers, use of power fuses in series with the old units, relay scheme to set up operation sequence of breakers or connection of current limiting reactors to them.

1. ま え が き

すべて負荷を持った電気の回路の開閉には遮断器を使っている。これが古くなったり、そのほかいろいろの原因でときどき事故を起している。それでその対策を考えてみる。ただし問題になるのは古い油入遮断器であるからこれを対象にする。

2. 交流遮断器の改造

すでに昔から発電所や変電所および工場内に設置してある遮断器も次のようなわけで取り替えるか改造をしなければならない。

1. 電力系統の連繫により、または発電所の容量増加に伴い、遮断すべき故障電流が大きくなったとき。
2. たびたびの事故遮断により遮断性能が低下したとき。
3. 最初の製作不良のため数次事故を惹起するとき。

2.1 対 策

さて、これらの対策としてまったく新しい遮断器と置き換えることは最上の方法ではあるが、安くても目的を達するためには次のようなことも考えられる。

1. 遮断消弧室を改良すること。
2. 電力可溶器を直列に使用し、故障電流は可溶器で遮断し、常時の電流は古い遮断器で遮断する。
3. 継電器の操作により遮断器の動作順序を設ける方法。

4. 限流リアクトルを遮断器と直列に挿入する方法などがあるが、第一の消弧室を改良することはもっとも簡単である。大体の遮断器は油入形で並切式または早切式の接触部であるので、これを消弧室と取り替えるもので、場所および油槽の深さが許されるならば推奨すべき手段である。この方法がはたして効果があるかどうかを 2, 3 の電力会社で実験されたのでこれを調べてみることにす

る。

2.2 試験その 1

昭和 29 年の 6 月にある変電所で 4 種類の供試遮断器を同所にすえ付けてある単相 10,000 kVA、電圧 66 kV/3.3 kV の変圧器 3 台を電源として試験を行った。これらの遮断器は古いもので定格は一応表 2.1 のようになっている。

表 2.1

	(A)	(B)	(C)	(D)
電 圧 (kV)	6.9	6.9	3.45	6.9
電 流 (A)	400	600	450	600
油 量	75 立	75 立	38 立	45 立
油 槽	別-小判	共-角	共-角	別-小判
接触部	チューリップ	チューリップ	チューリップ	チューリップ

(注) 別=槽形 小判=小判形 共=共通油槽 角=角形 チューリップ=チューリップ形

遮断容量は (A) 150 MVA, (B) 75 MVA, (C) 85 MVA, (D) 50 MVA となっていたが、実際はそれぞれ 40 MVA, 30 MVA, 5 MVA, 30 MVA くらいであるらしい。これは遮断試験の責務も異なるが、設計の点にも難色があるらしい。すなわちこれらには並切式の接触部がついている。この古いものに消弧室を付して試験したがはたしてその効力を発揮してつぎのようになった。

表 2.2 遮断試験の成績

	(A)	(B)	(C)	(D)
実遮断容量 (MVA)	130	130	70	100
アーク時間 (c/s)	1.2	1.3	1.4	2.0

これくらいの性能が出れば最新形のものに比し遜色がない。

2.3 試験その 2

昭和 29 年にも試験が行われ、電源電圧は 77kV、変圧器は 10,000 kVA 単相のもの 7 台を使用し、その二次側 22 kV の回路にて、種々の遮断器の遮断試験を行った。このとき得られた最大の遮断電力は 600 MVA であ

った。これらの試験のうち興味のある改造品の分につき記すと、表 2.3 のとおりである。このときの改造形も 4 種類で

表 2.3

	(E)	(F)	(G)	(H)
電 圧 (kV)	25	35	25	35
電 流 (A)	600	600	400	400
定格遮断容量(MVA)	750	350	—	400
消 弧 室	なし	なし	なし	なし

これを改造して消弧室を付し、機構を改良したので、定格遮断容量は新ルールで、
それぞれ 500 350 320 400
と称せられたが、実際に遮断試験をしてみると、
600 600 600 500
くらいになった。ただし、おのこの油量は
810 l 411 l 220 l 500 l である。
このときの試験から見て次のことがいえる。
現用の並切形遮断器の遮断容量、とくに噴油量からみた実用遮断可能範囲は、実系統における再起電圧、固有周波数が相当低いとしてもせいぜい 200 MVA くらいで、小判形のものにおいては 50 MVA 程度と考えられるものもある。

3. 改造用消弧室

三菱電機ではずっと以前に、東京電灯株式会社に納入された外国製の油入遮断器で、定格電圧 22 kV 用のもので、接触部も並切式のものを消弧室付に改造したことがあるが、そのとき使用したデアイオングリッド形消弧室は図 3.1 のようなものである。今回前掲の試験に使用された消弧室もこれと類似のものであっただろうと思う。しかしながらこの並切形の改造品 ABCD の試験結

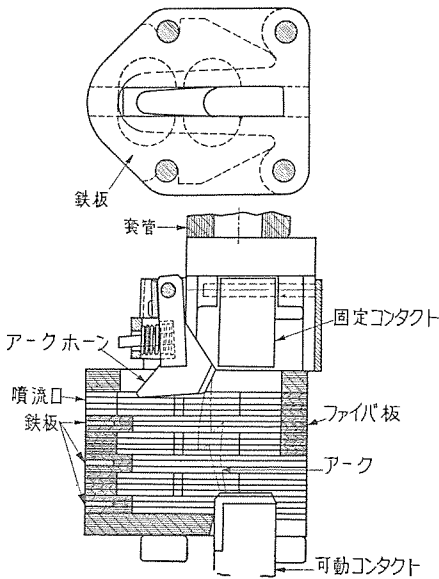


図 3.1 デアイオン形消弧室
Fig. 3.1 Deion arc extinguish chamber.

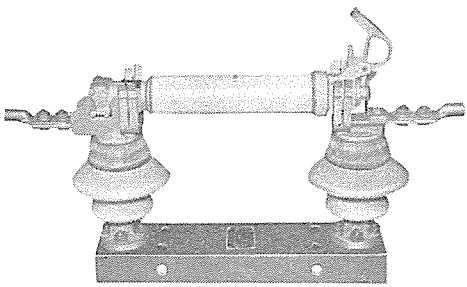


図 3.2 BA-1 形電力可溶器
Fig. 3.2 Type BA-1 power fuse

果は遮断試験だけではあったが、新製品と同程度の結果を示しており、現用並切形を改造によって十分現在の新製品に劣らない性能をもたすことが可能であるという結論を得た。しかしこの性能を得るためには操作機構も取り替えたものがあり、経済的改造といい得ない点もある。

3.1 高压電力可溶器を古い遮断器に 直列に 使用する 方法

油入遮断器の両側または電源側にはたいていは断路器が入れている。それで断路器形になった電力可溶器を代りに取り付けるのである。図 3.2 がそれで、これならかなり遮断容量の大なるものが得られる。しかしなぶん可溶器のことであるから、1 本だけ切れて単相負荷の残る心配があるといわれるが、実際可溶器の切れるときは音が出るし、また単相負荷になると電動機負荷なら過負荷になるから、小時間後には三相遮断するからその心配はまずない。この方法は火力発電所の補助回路などによく採用されている。その使用法をいま少し記すと、まず保護継電器付の遮断器と電力可溶器と動作時間を協調させなければならない。たとえば図 3.3 のように可溶器を遮断器と直列に接続して使用するが、このとき動作協調を考慮して遮断器の遮断容量以内の過電流では遮断器を働かし、その限度以上のものは可溶器をもってする

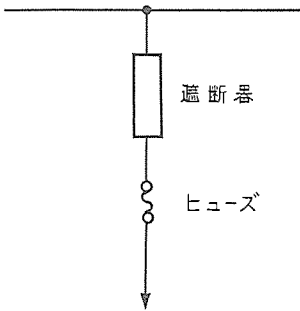


図 3.3 可溶器と遮断器との接続
Fig. 3.3 Connection of fuse and circuit breaker.

ように選定する。参考のために電動機保護用遮断器と可溶器との協調を示す曲線を図 3.4 に示す。

3.2 遮断器の動作に順序をつける方法

これは時限を持った継電器を使用して、大きな遮断容量を持った遮断器でまっさきに事故電流を遮断するよう

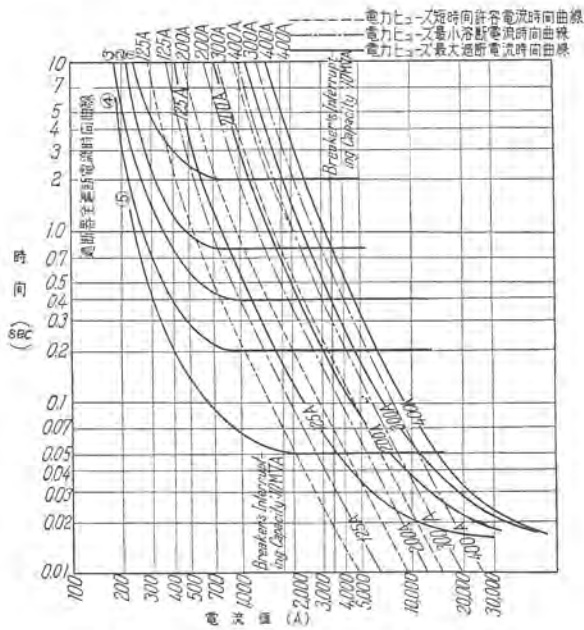


図 3.4 電動機保護用遮断器と可溶器との協調
Fig. 3.4 Coordination of motor protecting circuit breaker and fuse.

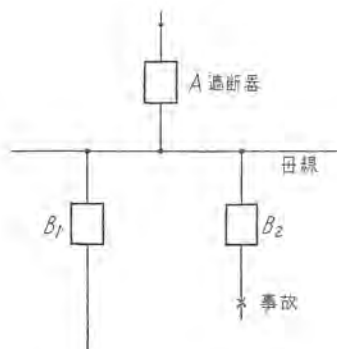
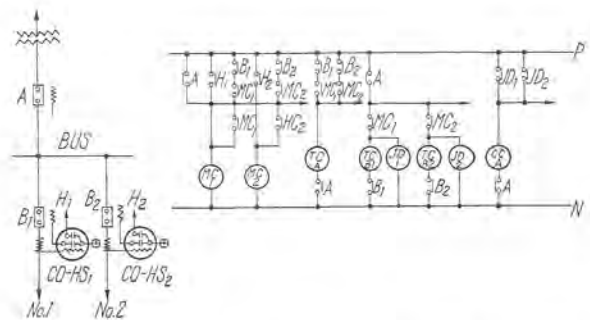


図 3.5 遮断器の選択遮断
Fig. 3.5 Selective interruption of circuit breakers.

にしてもよいが、これでは小区域の事故でもずいぶん広い範囲の停電を余儀なくされる場合が起る。それで図3.5のような場合、×印のところで事故が起り、ある電流 (B_2 遮断器で処理できる電流) を超過すると、 B_2 点の継電器の接点を閉じ、 A の遮断器を開放した後、 A 遮断器の接点で B_2 の遮断器を開放する。 B_2 遮断器が完全に遮断すると、ただちに A 遮断器を投入する。かく



① 饋電線故障の場合 B_1, B_2 などの各遮断器が遮断容量を持たない時はまず A を遮断、ついで B を遮断の後 A を再投入する方法を自動的に行わせる回路を示したものである。

動作説明

- 今 No. 1 饋電線に短絡故障があったとすると、 $CO-HS_1$ の瞬時過電流要素 H_1 が動作して MC_1 が自己保持する。
- MC_1 の動作でただちに主遮断器 A が遮断される。
- MC_1 が動作していることおよび主遮断器 A が遮断されたことを条件として遮断器 B_1 が遮断される。
- 同時に限時継電器 JD_1 が起動し一定限時の後主遮断器 A を再投入する。
- B_1 が遮断され、 A が投入された状態では補助継電器 MC_1 の自己保持回路が開かれるため装置はもとの状態に復帰する。
- $CO-HS$: 誘導形過電流継電器瞬時過電流要素付
- A : 主遮断器
- B_1, B_2 : 各饋電線の遮断器
- MC : 補助継電器
- JD : 限時継電器

饋電線 1 回路あたり所要器具
3— $CO-HS$ 形過電流継電器
1— $MC-40$ 形補助継電器
1— $JD-10$ 形限時継電器

図 3.6 遮断器の選択遮断方式

Fig. 3.6 Selective interruption system of circuit breakers.

すれば 5 秒程度でこの操作を終了し、 B_1 回路の停電も 5 秒間で済む。それゆえ A のところへ必要の大きさの遮断容量を持った遮断器を置けば、 B_1, B_2 のところでは古い遮断器でも事足りるわけである。ただし注意しなければならないのは B_1, B_2 遮断器は遮断容量の点では心配はないが、短時間許容電流の点で具合の悪いことも起りうるから一応調査する必要がある。

この方法を実際に使用したときの接続図を参考のために図3.6に示す。

3.3 限流リアクトルを遮断器に直列に挿入する方法

この方法は以前よく採用されたが、これはそのために電圧降下がつねに生じ損失もある、その上場所を占め値段も高くつくので今ではあまり用いられない。

安定度問題

研究所 安藤 安二*・馬場 準一**

Power System Stability

Engineering Laboratory Yasuji ANDO・Jun-ichi BABA

Stability of the electric power system is meant by recovery power working on it to bring back the balanced state to the apparatus on the system when disturbance has taken place in it. In a stable system synchronous machines remain synchronized and induction machines keep running with their slips within a permissible range. Problems on the stability of a power system involve a normal stability, a transient stability and hunting. Of them dynamic stability is explained, various factors affecting on transient stability is also mentioned, and finally calculation technique of stability is introduced herein.

1. ま え が き (安定度の概念)

電力システムの安定度とは、系統に擾乱が発生したときに系統の各機器に平衡状態にもどろうとする回復力が働くことと定義されている。したがって、安定な系統においては、同期機は同期を保ち、誘導機はそのすべりが過大になることなく運転されるわけである。

電力システムの安定度問題は普通つぎのように分類されている⁽¹⁾。

総合安定度	定態安定度	自動調整器のない場合 自動調整器のある場合 (動態安定度)
	過渡安定度	過渡動揺の半周期で判定する方法 (First swing transient stability) 過渡動揺の全周期にわたって判定する方法 (Multi-swing transient stability)
	乱調 (Hunting)	

定態安定度とは、系統に微少の擾乱が発生したとき、系統の機器が運転点の付近でどのような動揺を示すかをみるものであり、過渡安定度とは、系統に事故、線路の開閉のような大きい擾乱が発生したときの系統の機器の動揺をみるものである。乱調(hunting)とは、たとえば、アーク炉負荷のように変動する負荷に対する同期調相機の動揺のような系統の機器の振動現象のことをいう。

上記の各種安定度問題のうち、自動調整器のない場合の定態安定度についてはすでに筆者のひとりが本誌2月号に述べた⁽²⁾ので今回は触れないこととし、ここでは最近タービン発電機の進相運転に関連して問題になっている動態安定度について述べ、つぎに過渡安定度に影響を与える種々の因子に言及し、最後に安定度の計算技術をご紹介することとした。ハンチングについては、最近アーク炉負荷の動揺に伴うフリッカ現象に関連して同期調相機の電力動揺が論じられているが、これに関しては二三の文献を示す⁽³⁾にとどめ詳細は論じない。

系統安定度に関連して、回転機の特性的研究も進んでおり、とくに、最近風洞その他に大容量の誘導機が用いられる関係もあって誘導機の安定度に関する議論もよう

やく活発であるので、誘導機の特性的についても簡単に述べることにした。

2. 誘導機の電力動揺

従来、安定度問題の解析に当っては、誘導機は定インピーダンス回路で表示されてきたが、最近大容量の誘導機の使用あるいは、多数の誘導電動機を用いる工場配電システムの安定度が問題となるにおよび、誘導機の電力動揺が取り上げられるようになってきた。

誘導機に関しては、その次過渡効果を無視すると正相分、逆相分に対してつぎのような式がなりたつ。

正相分に関しては

$$\left. \begin{aligned} \dot{e}_1 + T_0 \frac{d\dot{e}_1'}{dt} + j s \omega T_0 \dot{e}_1' &= 0 \\ \dot{e}_1 &= V_1 - j x \dot{I}_1, \quad \dot{e}_1' = \dot{V}_1 - j x' \dot{I}' \end{aligned} \right\} \dots\dots (2.1)$$

逆相分に関しては、

$$\left. \begin{aligned} \dot{e}_2 + T_0 \frac{d\dot{e}_2'}{dt} + j(2-s)\omega T_0 \dot{e}_2' &= 0 \\ \dot{e}_2 &= V_2 - j x \dot{I}_2, \quad \dot{e}_2' = \dot{V}_2 - j x' \dot{I}_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots (2.2)$$

$$x = x_s + x_m, \quad x' = x_s + \frac{x_r x_m}{x_r + x_m}$$

$$T_0' = \frac{x_r + x_m}{2\pi f r}$$

V : 誘導機端子電圧

I : 誘導機電流

x_s : 誘導機の固定子漏洩リアクタンス

x_r : 同上の回転子漏洩リアクタンス

x_m : 同上の励磁リアクタンス

r : 回転子抵抗

s : すべり

f : 周波数

添字1は正相分、添字2は逆相分を示す。

式(2.1)、(2.2)より誘導機の等価回路としてただちに図2.1が得られる。この図からもわかるように、誘導機の等価回路は過渡インピーダンス jx' とその背後の起電力 \dot{e}_1' とで表わされることは同期機の場合とまったく同

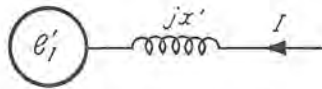
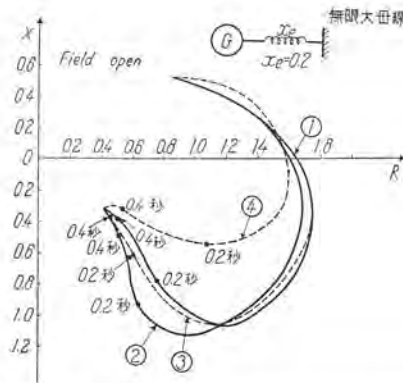


図 2.1 誘導機等価回路

Fig. 2.1 Induction machine equivalent circuit.

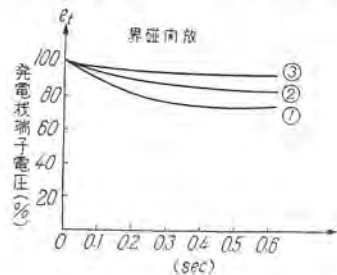
様であるが、同期機の場合と異なり、起電力 e'_i は誘導機の端子電圧によって定められる。同期機でも、タービン発電機のようないわゆる round machine では、界磁喪失時には誘導機として取り扱いうるので、式 (2.1) の x, x' に適当な値を入れることによって界磁喪失時の特性を式を用いて計算することができる。図 2.2 に界磁を開放した場合のタービン発電機の特性を電子管式アナログ計算機で計算した結果を示してある。



- ① 定格 MVA 85% 力率 lag. $T_d''=0.033$ 秒 $H=5.0$
 ② 同上 ただし $H=7.5$
 ③ 同上 ただし $H=3.0$
 ④ 同上 ただし $H=5.0$ $T_d''=0.07$ 秒

図 2.2 (a) インピーダンス軌跡

Fig. 2.2 (a) Impedance locus.



- $x_d = x_q = 1.20$ p.u. $x_d' = 0.20$ p.u. $T_d'0 = 5.0$ 秒
 $x_d'' = x_q'' = 0.10$ p.u. $T_d'' = 0.033$ 秒 $H=50$
 ① 1.0 p.u. MVA 力率 85% lag
 ② 1.0 p.u. MVA 100%
 ③ 1.0 p.u. MVA 力率 90% lead

図 2.2 (b) 界磁開放時の電圧降下

Fig. 2.2 (b) Voltage drop upon losing field excitation.

3. 動態安定度

近時、電力需要の増大に対処するために都市あるいはその周辺地域に 60 kV ないし 140 kV の高圧ケーブルによる電源導入が活発に行われつつあり、ケーブルのキャパシタンスの大きいことによってタービン発電機は進相運転を要求される場合がある。進相運転時には動態安定度の低くなることは古くから知られているところであって、図 3.2 に示すような系統では定態安定極限電力は

安定度問題・安藤・馬場

次式で与えられる。

$$\left(\frac{Px_q}{e_i^2}\right)^2 + \left(\frac{Qx_q}{e_i^2} + \frac{1}{2} \frac{x_e - x_q}{x_e}\right)^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{x_d + x_q}{x_e}\right)^2 + \frac{(x_d - x_q)(x_e + x_q)^2}{x_e x_q} \frac{\left(\frac{Px_q}{e_i^2}\right)^2}{\left(\frac{Px_q}{e_i^2}\right)^2 + \left(1 + \frac{Qx_q}{e_i^2}\right)^2} = 0 \quad (3.1)$$

このような場合に自動電圧調整器 (AVR) を用いることによって極限電力をいじりやすく増大させ、運転時の安定度の裕度を増すことができる。この場合の極限電力の解析は下記のようにして行われる。

運転点の付近の微小振動を考え、発電機の次過渡効果を見れば、発電機に関してはつぎの式がなりたつ⁽⁴⁾。

$$\begin{aligned} \Delta e_d &= -\Delta \psi_q \\ \Delta e_q &= \Delta \psi_d \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \Delta \psi_d &= G(p) \Delta E_{fd} - x_d(p) \Delta i_d - [x_d(p) - x_q] i_{q0} \Delta \theta \\ \Delta \psi_q &= -x_q \Delta i_q + \{E_{fd0} - [x_d - x_q] i_{d0}\} \Delta \theta \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{H}{\pi f} p^2 + Dp\right) \Delta \theta &= \Delta T_M - (i_{q0} \Delta \psi_d + \psi_{d0} \Delta i_q - i_{d0} \Delta \psi_q - \psi_{q0} \Delta i_d) \\ G(p) &= \frac{1}{T_{d0}' p + 1}, \quad x_d(p) = \frac{T_{d0}' x_d' p + x_d}{T_{d0}' p + 1} \end{aligned} \quad (3.4)$$

e : 端子電圧

i : 発電機電流

ψ : 磁束

H : 単位慣性定数

x_d : 直軸同期リアクタンス

x_d' : 直軸次過渡リアクタンス

x_q : 横軸リアクタンス

T_{d0}' : 開路界磁時定数

p : $\frac{d}{dt}$

添字 d : 直軸

q : 横軸

f_d : 界磁

0: 運転点における値

系統に関しては

$$\begin{aligned} \Delta e_d &= -x_q \Delta i_q \\ \Delta e_q &= x_d \Delta i_d \end{aligned} \quad (3.5)$$

AVR に関しては、磁気増巾器形 (MAG AMP 方式) のものではその伝達関数を $H(P)$ とすれば

$$\begin{aligned} \Delta E_{fd} &= H(p) \Delta e_i \\ \Delta e_i &= \frac{e_{d0}}{e_i} \Delta e_d + \frac{e_{q0}}{e_i} \Delta e_q \end{aligned} \quad (3.6)$$

e_i : 端子電圧

また、図 3.1 のベクトル図から見るように運転点における電圧、電流値と発電機の出力 (有効出力 P 、無効出力 Q) との関係は次式で与えられる。

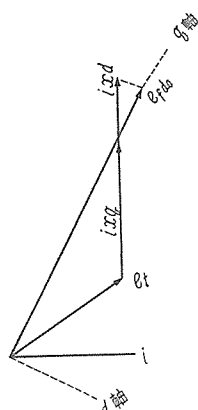


図 3.1 突極機のベクトル図

Fig. 3.1 Vector diagram of salient pole machine.

$$\left. \begin{aligned} \frac{e_{d0}}{e_t} &= \left(\frac{Px_q}{e_t^2} \right) / \sqrt{\left(\frac{Px_q}{e_t^2} \right)^2 + \left(1 + \frac{Qx_q}{e_t^2} \right)^2} \\ \frac{e_{q0}}{e_t} &= \left(1 + \frac{Qx_q}{e_t^2} \right) / \sqrt{\left(\frac{Px_q}{e_t^2} \right)^2 + \left(1 + \frac{Qx_q}{e_t^2} \right)^2} \\ \frac{x_q i_{q0}}{e_t} &= \frac{e_{d0}}{e_t} \\ \frac{x_q i_{d0}}{e_t} &= \frac{\left(\frac{Px_q}{e_t^2} \right) + \left(\frac{Qx_q}{e_t^2} \right) \left(1 + \frac{Qx_q}{e_t^2} \right)}{\sqrt{\left(\frac{Px_q}{e_t^2} \right)^2 + \left(1 + \frac{Qx_q}{e_t^2} \right)^2}} \\ \frac{E_{fd0} - (x_d - x_q) i_{d0}}{e_t} &= \sqrt{\left(\frac{Px_q}{e_t^2} \right)^2 + \left(1 + \frac{Qx_q}{e_t^2} \right)^2} \end{aligned} \right\} (3.7)$$

式 (3.2)~(3.6) を解くことによって極限電力を求めることができるが、それには電子管式アナログ計算機によるのが便利であって、つぎのような解析結果が得られている。

1. 動態安定極限電力は発電機の慣性定数 H 、開路界磁時定数 T_{d0}' 、直軸過渡インピーダンス x_d' などによってほとんど影響をうけない。

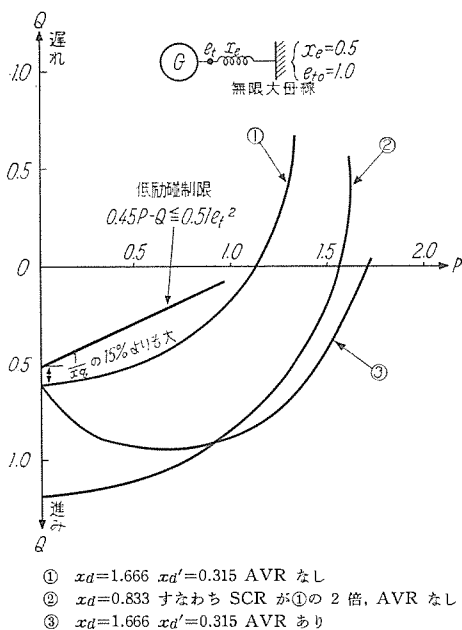


図 3.2 定安定度限界曲線

Fig. 3.2 Stability limit curves.

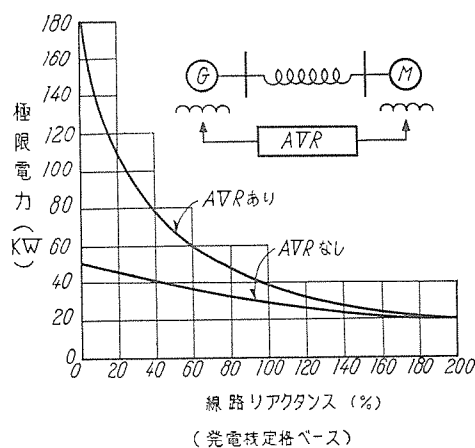


図 3.3 BJ 形による動態安定度

Fig. 3.3 Dynamic stability, due to BJ type.

2. AVR を有する発電機は、その短絡比が AVR を有しない発電機の半分であっても、ほぼ同じ安定限度を有する。

3. 極限電力は、発電機の端子電圧の自乗に比例する。図 3.2 に AVR のある場合とない場合の極限電力の比較を示してある。この図でみるように AVR によって進相運転時の発電機の極限電力はいちじるしく増大することがわかるが、実際にはタービン発電機にあっては端部加熱などの現象によって動態安定度の領域において運転することはなく、極限電力の増大は運転上の裕度と考えており、実際には低励磁制限回路を付して進相出力を制限している。

系統の等価インピーダンス x_e を求めるには発電所の高圧母線における故障 kVA を求め、発電所の kVA をこの故障 kVA で除せばよい。故障 kVA を求めるにあたって、系統の同期機のインピーダンスとしては x_d をとるべしとする説と x_d' をとるべしとする説があつて一定していないが、動態安定度の電力動揺の周期が数秒前後であることを考えると $\frac{(x_d + x_d')}{2}$ をとるのが妥当と考える。

極限電力は磁気増巾器形のいわゆる連続形 AVR によってだけでなく、BJ 形のような不連続形 AVR によっても増すのであって、ウェスチングハウス社で模擬セットを用いた実験結果が報告されておりその結果を示すと図 3.3 のように、BJ 形の AVR によって極限電力はいちじるしく増大することがわかる⁽¹¹⁾。

4. 過渡安定度

4.1 過渡安定度の解法

過渡安定度については、経験的に、電力動揺の最初の動揺で安定であれば多くの場合それ以後の動揺においても安定であることがわかっているの、いわゆる First Swing Transient Stability の方法により、つぎの仮定を設けて計算を行っている。

1. 電力動揺の全期間にわたって機械的入力是一定である。

現在までのところでは、調速機は非常に大きな不感帯をもっているため、応動がおそく、その動作は過渡安定度を決定する因子とはならないのでこの仮定が設けられている。

2. 同期機は一定リアクタンスおよび一定電圧によって代表される。

リアクタンスは初期の瞬間では次過渡リアクタンスであるが、やがて過渡リアクタンスへと増加して最後には飽和同期リアクタンスになる。リアクタンス背後の電圧は、「次過渡リアクタンス背後の電圧」より同様のサイクルを経て、「過渡リアクタンス背後の電圧」を通して「飽和リアクタンスの背後の電圧」へと移行する。

次過渡期間の継続は一般に段々法計算の時間間隔より短いので次過渡効果は無視される。これは解を安全側に傾けることになる。

過渡期間はつぎの時定数をもって、定常状態に移る。

$$T_{d'} = \frac{X_a'}{X_a} T_{d0'} \dots \dots \dots (4.1)$$

$T_{d0'}$: 同期機開路界磁時定数

X_a' : 機器の過渡リアクタンスと故障点までの外部リアクタンスの和

X_a : 機器の同期リアクタンスと故障点までの外部リアクタンスの和

故障が機器よりも離れて遠くにあるときは、 X_a' と X_a とはほとんど等しくなるとしてその結果 $T_{d'}$ は 5 秒程度となりうる。これは電力動揺の周期よりも非常に長くなるので通常行っている仮定が合理的になる。故障が機器の近くにあるときには、 X_a' は X_a よりも小となるのでその結果 $T_{d'}$ は 1 秒程度に減少してしまう。この時間は普通の電力動揺周期に近くなるので、通常行っている仮定では若干誤差を含んでくる。

突極性も通常は無視しているが、必要なときには突極性を考慮することができる。

3. 同期電力はその機器が接続されている回路網の定常状態解から計算できる。

この仮定は大体において誤差は少なく、さらに正確に計算すべきことは少ない。電力動揺の周期はほぼ 1 秒であるから、回路網の電気的時定数よりも長く、電気的過渡現象は急速に消滅するので、問題には影響しない。

4. 制動トルクおよび非同期トルクを無視する。

通常の計算は、以上の仮定によって行われるが、AVR の過渡安定度に及ぼす影響などの特殊問題に対しては、上述の仮定を排して、正確な方法によって解析が行われる。

4.2 過渡安定度に影響を与える諸因子

一般に、2 機系統を考えてみると、2 機の間に受授される電力 P は、下記の式で与えられる。

$$P = \frac{E_1 E_2}{X_{12}} \sin \theta_{12} \dots \dots \dots (4.2)$$

(X_{12} は伝達インピーダンス)

したがって、両機間の位相差 θ_{12} が一定の場合に、電

安定度問題・安藤・馬場

力 P は、内部起電力 E 、両機間のリアクタンス X_{12} によって影響をうけることがわかる。このような、簡単な場合についての考え方から、安定度に影響を与える諸因子を列挙していくとつぎのようになる。

(1) 送電線のリアクタンス

送電線のリアクタンスは式 (4.2) の X_{12} に直接関係する因子である。超高压系統においては、複導体がいられるが、複導体はそのリアクタンスが小さく、対地容量が大きいので、複導体線の固有負荷 (SIL) は単導体線の SIL よりも約 25% 増加する。

(2) 直列蓄電器

直列蓄電器はその負のリアクタンスによって線のリアクタンスを補償するので、安定度は増加する。スエーデンは Midskog-Hallsberg 間 475 km (380 kV 系) の電線路において、Djurmo および Haverö の 2 箇所にそれぞれ 20% ずつ補償する直列蓄電器を設けて、送電容量の増大を計っている。

(3) 発電機・変圧器のリアクタンス

発電機・変圧器のリアクタンスも X_{12} に直接関係する因子であって、これらを低くすることによって安定度は増大する。

(4) 故障の除去時間

故障時には機器の間の伝達インピーダンス X_{12} が大きくなり、また、起電力 E が減衰していくので、故障除去時間は安定度に影響するところがきわめて大きく、高速度リレー方式の採用によって安定度はいちじるしく向上する。一例として⁽⁵⁾、図 4.1 に発電機から低リアクタンス系統に負荷を送る場合に、故障除去時間を 12 サイクル、6 サイクルあるいは瞬間とした場合の許容負荷の増加を示している。故障除去時間の瞬間とは故障のない状態で遮断器を開放とするもので単に系統のリアクタンスが増加する場合についてと等価である。この図から、最大タービン定格で運転し、1.03 Per Unit の端子電圧で運転している発電機で、発電所高圧母線に近いところで三相事故が起きても、12 サイクルの故障除去をやれば安定であることを示している。

(5) 中間開閉所

中間開閉所を設けると、故障除去後の機器の間の伝達インピーダンス X_{12} が小さくなってくると、安定度は

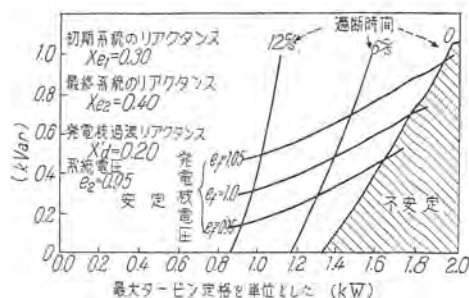


図 4.1 故障除去時間と安定度

Fig. 4.1 Fault clearing time and stability.

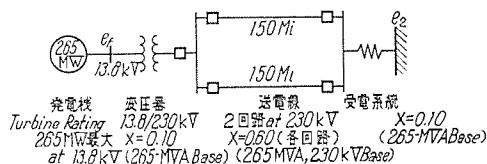


図 4.2 (a) 系統図
Fig. 4.2 (a) System diagrams.

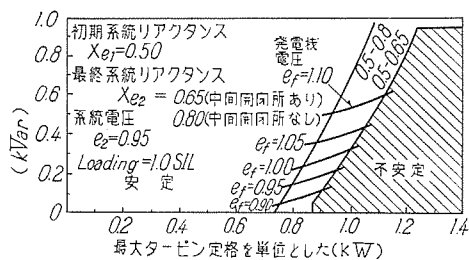


図 4.2 (b) 中間開閉所と安定度
Fig. 4.2 (b) Intermediate switching station and stability.

増大する。一例として⁽⁵⁾、約 250 km の二回線線路において中間開閉所を設けたときの安定度の増大することを図 4.2 に示してある。

(6) 高速再閉路

高速再閉路も、また故障除去後の系統リアクタンスを小さくすることによって安定度の向上に資するところが大きく、最近の超高压系統において用いられるものである。

(7) 速応性 AVR

速応性の AVR は、同期機の過渡リアクタンス背後の電圧を高めることによって系統の安定度の向上をもたらすものであって、スウェーデンでは整流器による高速励磁を採用しており、また、ソ連においても高速度電子管式の AVR をその 400 kV 系統に用いている。

図 4.3 に AVR の速応比 (response ratio) と極限電力との関係を数値形計算機にて求めた結果を示してあ

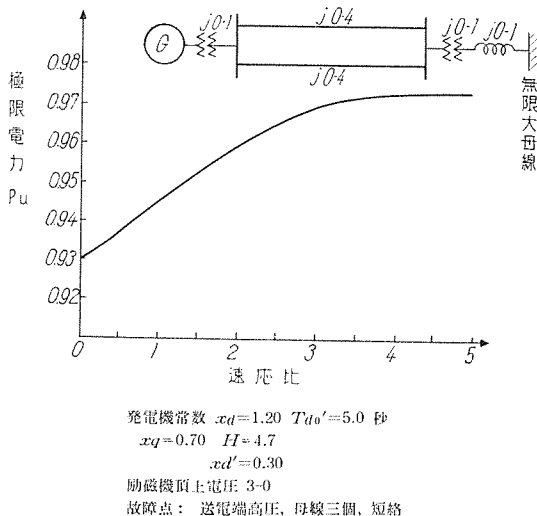


図 4.3 AVR の速応比と極限電力
Fig. 4.3 Response ratio and stability limit.

る。

この図では速応比が増すに従って、極限電力の増加率は下がっているが、これは励磁機の頂上電圧を 3.0 Per Unit に押えてあるためである。

(8) 中性点接地方式

中性点接地方式によって、零相回路の値が左右され、系統の故障時における機器の間の伝達インピーダンスの値が変わってくる。一般に直接接地系は安定度に対しては苛酷である。高リアクタンス接地の系統においては、故障電流を制限することによって同期化力が増大し、抵抗接地系では、この抵抗に電力が吸収されて、発電機の出力が増加し、その加速はこれに対応しておくられる。

図 4.4 は代表的な系統における故障に対して、故障継続時間および中性点に接続されたインピーダンスの関数として極限電力を示すものである⁽¹¹⁾。この曲線によると中性点のインピーダンスは安定度の維持に役だつ。電力系統安定度に関する中性点接地方式の重要性は高速度遮断器ならびにリレーの発達によって少なくなってきている。

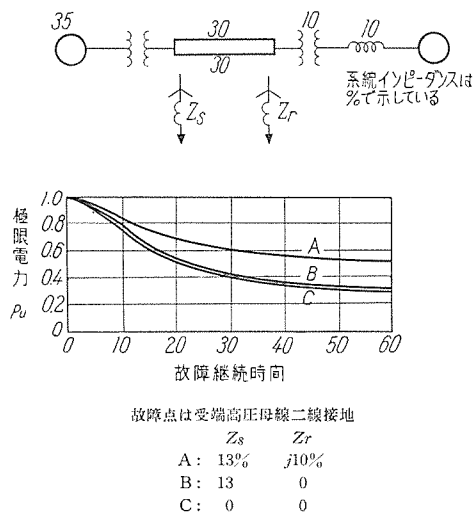


図 4.4 中性点接地方式と安定度
Fig. 4.4 Neutral grounding system and stability.

5. 安定度の計算技術

安定度の計算方法に関しては、簡単な 2 機系については等面積法があり、複雑な系統では交流計算盤を用いて段々法によって計算されているが、いずれも自動化された計算方法ではない。最近、各種計算機の発達に伴って安定度の計算を自動化する方法が考えられてきた。それらを分類するとおよそつぎのようになるであろう。

1. Swing Calculator による方式
2. 相似形計算機による方法
 - (i) 電子管式
 - (ii) サーボ形
 - (iii) 模擬回路式
3. 数値形計算機による方法

5.1 Swing Calculation による方法

これは、従来の段々法による計算の半自動化方式ともいべきものであって、交流計算盤と組み合わせて使用されるものである。計算のブロック図は図 5.1 のよう

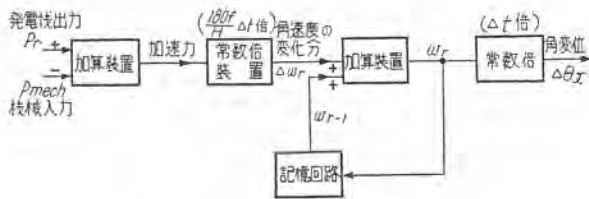


図 5.1 過渡安定度の計算回路

Fig. 5.1 Calculation circuit of transient stability.

あって、第一段の計算回路で(回転機入力 P_{mech})-(回転機出力 P_r)=加速力を計算し、第二段の計算回路によって角速度の変化分

$$\Delta W_r = \frac{180f}{H} \Delta t (P_{mech} - P_r)$$

を計算する。第三段の計算回路によって記憶回路の出力に上記 ΔW_r を加算して角変位 $\Delta \theta_r = (\Delta W + \Delta W_{r-1}) \Delta t$ を求めるもので、記憶回路は各段階の終りにおける角速度 W_r をポテンシオメータの平衡をとることによって求められる。この種の計算機としては外国では W 社、GE 社、BTH 社のものがあり、わが国では三菱電機⁽⁶⁾のものがある。

5.2 相似形計算機による方法

最近の電子管式アナログ計算機の進歩に伴い、過渡安定度の問題を電子管式アナログ計算機でとくことができるようになった⁽⁷⁾。しかしこの方法によるときは一般に n 機系に対して $n(n-1)$ 個の演算増巾器と関数発生器とを必要とするので、特殊の問題を除き、必ずしも実用的な方法ではない。

また、サーボ関係の技術の進歩に伴い、従来の交流計算機の発電機単位にサーボモータを付して自動化を計画するものがあり、一般に Stability Computer として研究発表されている⁽⁸⁾。

その他、仏国においては、模擬送電線と模擬発電機の組み合わせよりなる micro-machine と称する動的な模擬回路があって、安定度問題に活用されている⁽⁹⁾。

5.3 計数形計算機による方法

安定度問題のように段々法によって解くことのできる問題は、各段階における計算の形式がまったく同じであるので、計数形計算機の計算に適している。この方法に関する研究は従来ほとんどないので、実例も示して、やや詳細に解説することにする。

計数形計算機においては、交流計算機と異なりベクトル量(複素数)を取り扱うことができないから、系統の方程式を実数に書き直す必要がある。

まず、同期機に関して、従来の仮定、すなわち、過渡時の突極性を無視し、界磁時定数が十分大きいものとする、同期機の式は過渡インピーダンスの背後の起電力を \dot{E}' とすればベクトル形式で

$$\frac{d\dot{E}'}{dt} + j\omega s \dot{E}' = 0 \quad (5.1)$$

s : すべり

ω : 角周波数

となる。これを実部と虚部とにわけて

$$\dot{E}' = e_d + je_q \text{ とすれば}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{de_d}{dt} &= \omega s e_q \\ \frac{de_q}{dt} &= -\omega s e_d \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.2)$$

となる。

つぎに、誘導機の式であるが、これは §2 の式(2.1)

において $\dot{E}' = e_d + je_q$ とおくことによって、

$$\left. \begin{aligned} \frac{de_d}{dt} &= \omega s e_q - \frac{1}{T_0} \{e_d - (x-x')i_q\} \\ \frac{de_q}{dt} &= -\omega s e_d - \frac{1}{T_0} \{e_q + (x-x')i_d\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.3)$$

となる。

さらに、回路網に関しては、自己、および相互アドミタンスを y_{ii} , y_{ij} とすれば、系統各機器の電圧 \dot{E} , 電流 I についてつぎのベクトル式がなりたつ。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \dots & y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_1 \\ \dot{E}_2 \\ \vdots \\ \dot{E}_n \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

ここで \dot{E} , I , y をそれぞれ実部と虚部とに分けると

$$I = i_d + ji_q, \quad \dot{E} = e_d + je_q, \quad y = y_d + jy_q$$

であるから、

$$\left. \begin{aligned} i_d &= [y_d][e_d] - [y_q][e_q] \\ i_q &= [y_q][e_d] + [y_d][e_q] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.5)$$

ここに、

$$\begin{aligned} [I_d] &= \begin{bmatrix} i_{1d} \\ \vdots \\ i_{nd} \end{bmatrix}, & [I_q] &= \begin{bmatrix} i_{1q} \\ \vdots \\ i_{nq} \end{bmatrix} \\ [e_d] &= \begin{bmatrix} e_{1d} \\ \vdots \\ e_{nd} \end{bmatrix}, & [e_q] &= \begin{bmatrix} e_{1q} \\ \vdots \\ e_{nq} \end{bmatrix} \\ y_d &= \begin{bmatrix} y_{11d} & y_{12d} & \dots & y_{1nd} \\ y_{21d} & y_{22d} & \dots & y_{2nd} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1d} & y_{n2d} & \dots & y_{nnd} \end{bmatrix} \\ y_q &= \begin{bmatrix} y_{11q} & y_{12q} & \dots & y_{1nq} \\ y_{21q} & y_{22q} & \dots & y_{2nq} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1q} & y_{n2q} & \dots & y_{nnd} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

各機器の電力動揺に関しては

$$2H \frac{ds}{dt} = (e_d i_d + e_q i_q) - T \quad (5.6)$$

T : はタービンよりの入力

結局、安定度は式(5.2), (5.3), (5.5), (5.6)を解くことに帰着するわけである。

これらは、多元連立一次常微分方程式であって、その解法には Runge-Kutta 法によるのが便利と考える。それは、Runge-Kutta 法の誤差が時間間隔 (Δt) の 5 乗の程度に小さいことと、計算の途中で (Δt) を変更することが容易なためである。従来の交流計算機に用いられていた段々法は数学的には Euler の近似であってその誤差は (Δt^2) の程度である。Runge-Kutta 法の詳細については応用数学の参考書⁽¹⁰⁾に詳しいので、ここには説

明を省略させていただく。この方法によって、図 5.2 に示すような誘導機を含む某工場の配電系統の安定度を計算した結果を図 5.3 に示してある。この系統は同期機のすべりが負から正にうつり、かつ、誘導機のすべりも大なる値に達せずにもとの値へともどっているので安定と判断される。

つぎに計数計算機を用いて、極限電力を求める方法について述べる。

それには、まず、最初に任意に二つの電力 P_{10}, P_{20} を考え、 P_{10} では系は必ず安定で、 P_{20} では系は必ず不安

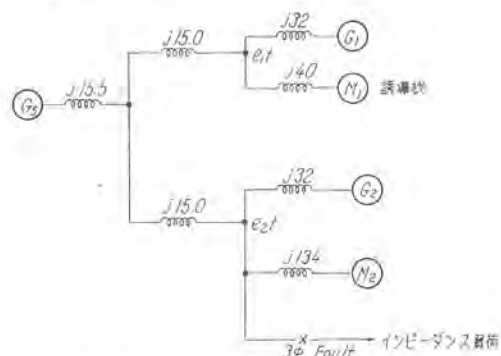


図 5.2 等価回路 (10,000 kVA Base)

Fig. 5.2 Equivalent circuit.

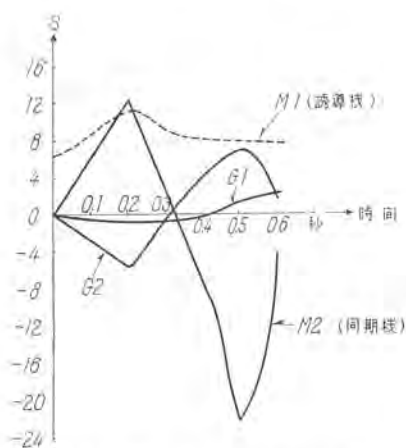


図 5.3 (a) すべりの時間的変化

Fig. 5.3 (a) Hourly changes of slip.

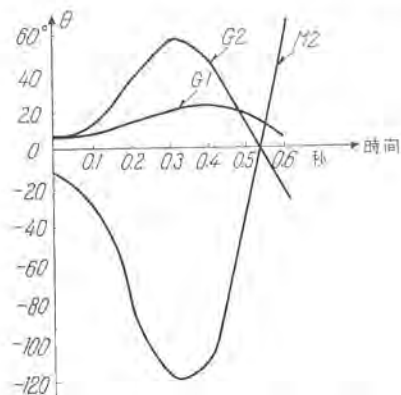
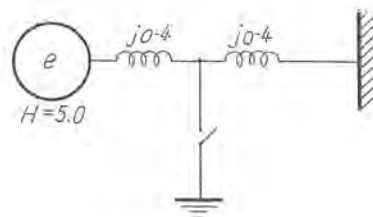


図 5.3 (b) 位相角の時間的変化

Fig. 5.3 (b) Hourly changes of phase angle.



故障条件 三相短絡
故障除去時間 0.15 秒 (9 c.s.)
計数形計算機による極限電力 0.98828 p.u.
等面積法 0.98 と 0.99 の間

図 5.4 モデル計算

Fig. 5.4 Model demand.

定であるように選んでおく。つぎに $P_1 = \frac{P_{10} + P_{20}}{2}$ なる電力に対して系統の安定性を計算する。系の安定性は、いわゆる First Swing Transient Stability により、同期発電機については $S > 0$ 、同期電動機については $S < 0$ となれば安定と判断し、 $|\theta| = \left| \int_0^t S dt \right| > 180^\circ$ すなわち、一極すべつたら不安定と判定する。このようにして、 P_1 が安定の場合には電力を $P_2 = \frac{P_1 + P_{20}}{2}$ 、 P_1 が不安定ならば $P_2 = \frac{P_{10} + P_1}{2}$ 、として計算を進めてゆき、 $|P_n - P_{n-1}|$ が所要の値 (たとえば 0.01) 以下になったときに計算を停止して極限電力値として $\frac{P_n + P_{n-1}}{2}$ をとるのである。

このような方法によって、図 5.4 のように 2 機系について $\Delta t = 0.05$ 秒として極限電力を求めたものと、等面積法によって計算したものとを比較すると両者ほとんど差がなく Runge-Kutta 法による計算精度の高いことを示している。

6. む す び

安定度に関して、最近問題になっている動態安定度の問題を解説し、過渡安定度の増進法について従来の研究結果を紹介した。また、計算機の発達にかんがみ、計算機、なかんずく、計数形計算機による過渡安定度の計算法についての研究結果を紹介した。本文がなんらかのお役にたてば幸である。

なお、当社研究所電気第一研究室計算機室には、交流計算機、直流計算機、電子管式相似計算機を設置し計算機の改良と同時に多数の問題を計算し、なお最近設置された計算機 (Bendix G-15 形) による計算遂行にも協力しているが、その解析を分類すると、

電力関係

電力潮流・系統安定度・損失計算・保護継電器・誘導障害・系統の電圧周波数制御・系統の経済運用・系統構成・サージ・異常電圧

電気機器関係

同期機・誘導機・特性、各種機器の等価回路作成、計算

自動制御関係

位置制御、速度制御、その他各種制御

機械関係

ねじれ振動・応力計算・その他

熱関係

各種熱伝達

原子力関係, Simulator 関係

などの広範囲にわたっている。かつ、その処理件数も多くひとりあたり 1 週間に約 1 件を解いている現在であるが、電力関係だけにつきわれわれの関係した件数を大別してみると下記のような比率となっている。

	昭和31年4月 ↓ 昭和31年9月	昭和31年10月 ↓ 昭和32年3月	昭和32年4月 ↓ 昭和32年9月	昭和32年10月 ↓ 昭和33年3月
電力潮流	11%	—	12	11
損失計算	6	5	—	6
安定度	11	15	25	7
故障計算	28	25	25	14
機器特性	22	30	9	22
過渡現象	22	25	25	33

参考文献

- (1) Power System Stability Vol. II. S. B. Cracy.
- (2) 発電機と励磁機 (2) 定常安定度と過渡安定度 安藤安二 三菱電機 Vol. 32, No. 2, pp. 82~88.

- (3) たとえば ○Selection of Buffer Reactors and Synchronous Condensers on Power System Supplying Arc Furnace Loads C. Concordia, L. G. Levoy, Tech. Paper 57-56. Vol. 32, No. 2, P. 63.
○電弧炉による電圧変動とその防止法 馬場準一 三菱電機 Vol. 32, No. 2, p. 63.
- (4) Generalized Hunting Equations of Power Systems. W. G. Heffron & G. M. Rosenbury Tech. Paper 52-273.
- (5) How to Minimize System Stability Problems. D. B. Brandt, N. R. Schultz, H. O. Simmons. El. World July 22, 1957 Vol. 148, No. 4, pp. 82~85.
- (6) 交流計算盤 新井正元, 早瀬通明 三菱電機 Vol. 31, No. 3, pp. 10~24.
- (7) An Electric Analogue Method for the Direct Determination of Power System Stability Swing Curves. W. B. Boast, J. D. Rector Tech. Paper 51-338.
- (8) たとえば, Computer for Automatizing Network-Analyser Operation. A. Kusko, P. N. Heller Tech. 55-5.
- (9) Micro-machine and Micro-reseaux. R. Robert: CIGRE Report 338, 1950.
- (10) たとえば Numerical Solutions of Differential Equations. H. Levy & E. A. Baggott p. 106.
- (11) Transmission and Distribution Reference Book. W. H. p. 455, p. 484.

最近における当社の社外講演一覧

講演月日	主催または主催地	演 題	講 演 者	所 属
33-1-20, 21	東北電気文化会	照明の基礎と設計計算 (第4回照明技術講習会)	小堀富次雄	本 社
"-2-10	静岡県西部電気工事組合	蛍光灯, 高圧水銀灯の説明, 商店および工場照明	"	"
"-2-12	電気通信学会アンテナ研究専門委員会	Radome の測定法	喜連川隆・有田不二男	研究所
"-3-31	NHK-TV	電気スタンドの使い方 (電灯 80 周年記念放送)	小堀富次雄	本 社
"-4-2	三菱商事	最近の照明技術問題, 家庭照明, 工場照明	"	"
33-5-4	電気四学会連合大会	磁気論理要素による計数指令装置	大野栄一, 浜岡文夫	研究所
"-"-"	"	cds の絶縁破壊	山下博典, 伊吹順章	"
"-"-"	"	油入密閉機器における油上の窒素ガス圧の変化	白井万次郎	"
"-"-"	照明学会	硫酸塩蛍光物質に関する研究 (第7報)	井手平三郎	大 船
"-"-"	昭和 33 年電気四学会連合大会	蛍光灯の高周波振動におよぼすガスイオンの影響	土井貞春	"
33-5-5	電気四学会連合大会	誘導電動機の残留電圧	林 重雄	研究所
"-"-"	"	ビデオンのターゲット電流について	鷲尾信雄・中子睦夫	"
"-"-"	"	マイクロ波広帯域伝送直偏波パラボラアンテナの改良	立川清兵衛・喜連川隆	"
"-"-"	"	共鳴形単向管の順逆損失比の改善	中原照次郎・喜連川隆	"
"-"-"	"	航空機用テールキャップアンテナ	喜連川 隆・武市吉博	"
"-"-7	照明学会	光源 1.2 放電灯	小椋義正	無線機

電 気 機 器 の 防 食 問 題

本 社 中 野 光 雄*

Corrosionproof Problems on Electric Apparatus

Head Office Mitsuo NAKANO

Electric apparatus in chemical factories and chemical textile plants are, unlike those in ordinary works, exposed to the danger of chemical solution or corrosive gases in a highly humid environment. Special considerations to corrosionproofness, necessary as they are, are little paid by manufacturers in this country. This may be partly due to few demands in the past. However, enormous progress in the industry referred to after the restoration of peace has aroused attention on the problems because of frequent failures. Demands for strengthening the corrosionproof design by purchasers of the machines are now seriously taken up by manufacturers, who adopt it in their regular production.

1. ま え が き

化学工場や化繊工場などにおける電気機器は、一般工場と異なり、化学薬品の溶液や腐食性ガスにさらされ、しかも高い湿度の環境で使用される場合が多いから、防食に対しては特別の考慮を必要とするが、わが国メーカはこの点やや等閑に付していたようである。需要が少なかったのも一つの原因であるが、欧米のいわゆるケミカルモータに見るような材質、構造、塗装などに対する根本的研究が立ち遅れていた。

しかるに終戦以来化学工場、化繊工場の異常な発展に伴い、在来の標準機器に申しわけ程度の防食性を施した程度のもものでは間に合わなくなってきた。近時腐食による障害が頻発し、ようやく需要家の防食性強化に対する要望が強くなり、各メーカもそれぞれ独自の対策を研究試作し、本格的生産に移っている。

抜本的には設備環境を良くするという一語に尽きるが、普通電動機、配電盤、電気的接触部などの腐食、変質、錆化の問題が多いから、これらの点について材料、構造、塗装の各方面から述べて見たいと思う。

2. 防食に対する考え方

2.1 建屋の問題

労働基準法には下記のような規定がある。

第 42 条. 使用者は、機械、器具その他の設備、原料もしくは材料またはガス、蒸気、粉じんなどによる危害を防止するために、必要な措置を講じなければならない。

第 43 条. 使用者は、労働者を就業させる建設物および、その付属建設物について、換気、採光、照明、保温、防湿、休養、避難および清潔に必要な措置その他労働者の健康、風紀および生命の保持に必要な措置を講じなければならない。

また衛生基準として

第 172 条. ガス、蒸気または粉じんを飛散し、有害放射線にさらされ、騒音を発し病原体によって汚染されるなど衛生上有害な作業場においては、その原因を除去するため作業または施設の改善に努めなければならない。

第 173 条. ガス、蒸気または粉じんを飛散する屋内作業場においては、場内空気その含有濃度が有害な程度にならないように、局所における吸引排出または機械もしくは装置の密閉その他新鮮な空気による換気など適当な措置を講じなければならない。

以上労基法の一部をひろって見たが、これらの条項は就業者に対する人命保護と安全のための規定であることはもちろんであるが、もしこの規定が安全に守られるならば設備機械の防食問題もその大半は解決されるのである。

すなわち、化学工場、化繊工場に限らず一般の電解工場あるいは坑内などにおいて、上記労基法の定めるところに忠実に守られた施設が採られていれば、ガスの濃度、湿度などはおのずから低率に保持されるはずであるから、防食に対する考え方がきわめて楽になる。

しかし、建屋の構造、換気設備の完全を期するためには相当の費用を要するため、設備機器の防食構造に費用をかける場合と比較して、いずれが経済的であるかが問題である。

もし経済的に許されるならば、電気機器の設置場所は腐食ガスから完全に遮蔽された建屋とすることが望ましい。もし完全遮蔽が困難であれば、外気よりわずかに室内気圧を上げてやればよい。すなわち圧搾空気を室内に吹き込んでやればよい。大容量の回転機に対しては、冷却をかねて、フィルタおよびクーラを通じて清浄空気を吹き込むのも良策である。

2.2 消耗品としての考え方

小馬力たとえば 2, 3 馬力の電動機や、開閉器などを防食構造とすることは比較的高価になる場合が多い。し

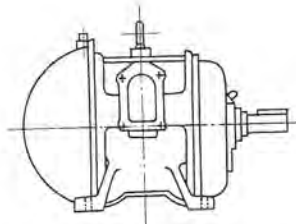


図 3.1 防食形全閉外扇形三相誘導電動機外形図

Fig. 3.1 Outline drawing of corrosionproof totally enclosed external fan type 3 phase induction motor.



図 3.2 10 HP 4 P 200 V 50 c/s 標準防食形電動機

Fig. 3.2 Standard corrosionproof motor.

たがって、これらは普通の標準機器を使用して 2, 3 年程度で新品と取り替えるのも一つの考え方である。米国は人命を尊重する国柄であるから、いわゆる労基法もきわめてきびしく有害ガスの発生工場は人の出入が禁止されるから、極力ガスの漏洩を防止する措置には費用を惜しまない。しかしかかる工場では定期的に機器を取り替えることを原則としている。

3. 防食電動機

防食電動機としては、内部機構部分を腐食性物質より遮断する必要があるから、もっぱら全閉外扇の形式が採用される。酸やアルカリの有害物質はあらゆる状態で電動機の表面に付着するから、たとえ表面に溶液がかかったり、蒸気が外部に付着しても、冷却して液粒となり、ただちに滴下して腐食を最小限度にとどめるために、電動機の表面はできる限り角部を避け、凹部を作らないよ



図 3.3 帝国化工納 100 HP 3,300 V 60 c/s 6 P 1,200 rpm レイモンドミル、ファン用防食電動機

Fig. 3.3 Corrosionproof motor for Raymond mill fan.

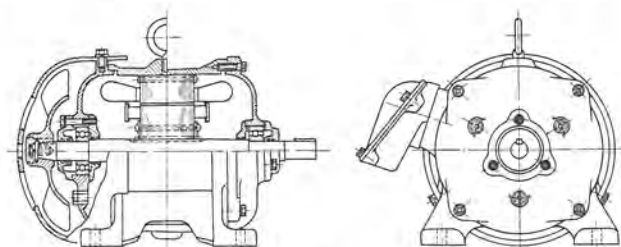


図 3.4 防食形全閉外扇形 MK 形三相誘導電動機構造図

Fig. 3.4 Construction drawing of corrosionproof totally enclosed external fan type MK 3 phase motor.

うに考慮し、なめらかにすることが肝要である。

図 3.1 および図 3.2 はその一例を示す。

3.1 構造と特長

固定子：一固定子のフレーム、ブラケットはともに厚肉の鋳鉄を使用し、その取付けは、機械加工を施した面の細密な深いはめ合わせとし、ホコリ、湿気、ガスの浸入を極力防止する構造となっている。

回転子：一回転子は一般のアルミダイカストをさけ、銅あるいは銅合金の回転子バーおよびエンドリングを使用している。エンドリングが腐食のために脱落するという事故を多く見聞きしている

が、これはロウ付材料が不適当であったようである。銀ロウ、シルホス、燐銅などが使用されるのが普通であるが、燐銅は二硫化炭素に弱い欠点がある。多くの実験や経験によれば、銀ロウがもっとも適当のようである。

冷却用外扇および外扇カバー：一冷却用外扇と外扇カバーはもっとも腐食されやすい部分である。したがって在来アルミ材をさけ、とくに耐食性の強い厚肉鋳鉄が使用される。外扇カバーも従来の網カバーはきわめて弱いので現在は鋳鉄に変わっている。図 3.3 はその一例である。

最近では、ガラスその他の無機、有機物質を基材として、ポリエステルその他のプラスチック材によって成形されたいわゆるプラスチックファンおよびプラスチックファンカバーが製作され、実用に供されている。このプラスチックファンは防食上有利なばかりではなく、軽量で慣性モーメントが少ないから、運転負荷が軽く、起動時の温度上昇も低く、騒音も少ないなどの幾多の利点をもっているから中小形の電動機には好適である。

また外部冷却扇用締付ボルトが腐食してその頭部がなくなり、あるいは冷却扇と回転軸とのはめ合部がさびつき分解を困難にする。さらにタガネやハンマーでたたいて無理に取りはずすために傷つけ、これがさらに腐食を進行させる結果となる。したがって図 3.4 の構造図に示すように軸端にテーパを作り、取付けボルトは軸端につけ、かつ防食パテで埋込んで外部腐食性物質に露呈しないようにしている。

軸受：一軸受構造はハウジングカバー方式を採用し、玉軸受を内外ハウジングカバーで包み、ラビリンスによりグリースの流出、外部塵埃などの侵入を防いでいる。

図 3.5 は屋外用低圧防食電動機および屋外用防食減速電



図 3.5 屋外形低圧防食電動機の軸受

Fig. 3.5 Bearing of outdoor type low voltage corrosionproof motor.

動機に適用された軸受の構造を示すもので、外側ハウジングカバーの内側に防食オイルシールをほどこしている。

グリースの補給構造に関しては、需要家とメーカーの間でしばしば論議されるところであるが、中小形の防食電動機では、グリースの補給穴を除き、軸受の点検およびグリースの補給は外側ハウジングカバーをはずして行くようにしている。多年の経験よりもっとも実用に則しているようである。すなわち化学工場においては給排油用栓は短期間で腐食のためネジがきかなくなるか、栓がボロボロになって使用できなくなるかがほとんどである。その時には給排油口は無益の長物となるばかりでなく、かえって外部腐食性物質の侵入を助けることとなり、グリースや軸受をそこなう場合が多い。さらにまた最近の玉軸受およびグリースの進歩は長期間にわたって点検および補給を要しなくなってきた。ことに密封式ボールベアリングの出現により給油穴の問題も一応解決されたようである。この密封ボールベアリングは図3.6に示すような構造で、ボールベアリングの中には現在のところもっとも耐老化性が大きく、酸、アルカリにも強いシリコングリースをあらかじめ適量封入してあるから数年間は分解してグリースを補給する必要がない。

端子箱および口出線：一端子箱は大形のコンデッドボックスタイプにして、図3.7の構造図に示すように、わくの斜め上に取り付け、さらに斜めに大きな銑鉄カバーを付けている。3本のリードはおのおの別個に引出しているから短絡事故の心配はない。リードの引出口には、電気的特性、耐食性、耐熱性のもっともすぐれた磁器製ブッシングを取り付け、わく側に耐熱耐酸コンパウンドを流し込んであるから、リード線がゆるんだり、ここからガスや腐食性物質が電動機内部へ侵入するがごとき恐れはまったくない。

口出線は近時合成ゴムの急速な発達により、電氣的、機械的諸特性を十分確保し、かつ耐食性の非常にすぐれた防食口出線が容易に製作できるようになった。図3.7に見るような全密閉された端子箱内において、この防食口出線は銅管端子接合部とともに、塩化ビニール絶縁テープで十分にテーピングされているから、腐食によって口出線を取り替えるがごとき煩わしさはほとんど解消されたといってもよい。

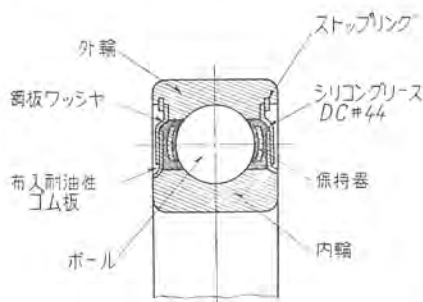


図 3.6 シールド ボールベアリング
Fig. 3.6 Sealed ball bearing.

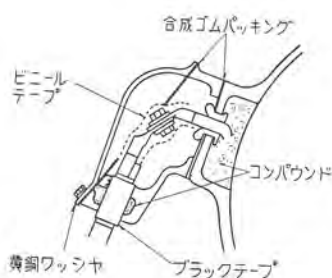


図 3.7 ケーブルヘッド部分
Fig. 3.7 Cablehead portion.



図 3.8 三菱化成黒崎工場納 屋外耐酸電動機
(有機ガラス名板使用)

Fig. 3.8 Outdoor acid-resisting motor.



図 3.9 モンサント化成納入
ナッシュポンプ用防食電
動機 30 kW 220V 60c/s
8 P 875 rpm. (有機ガ
ラス名板使用)

Fig. 3.9 Corrosionproof
motor for nash-pump.

名板：一化学工場に使用される電気機器の腐食で、もっとも多くの問題となるのは名板の腐食であろう。名板は直接機器の運転に支障をきたすものではないが、その使命は決して軽くはないのである。したがって名板の腐食については各メーカーともそれぞれ研究しているところであるが、現在のところでは金属地金に高級のステンレスチールを使用するか、または金属名板をメタアクリル樹脂でモールドングしたものが多く使われている。

メタアクリル樹脂は一般に有機ガラスと称せられ、耐酸性耐アルカリ性には強いが、常温において応力がかかるとクラックを起すことがあり、また応力のかかった状態で芳香族炭化水素に会うと細いひび割れ（クレイジング）を生ずる欠点がある。このためには電動機のわくにそって彎曲をつけ、耐熱アスベストシートをクッションとして使用すれば上記の欠点は除かれる。この有機ガラス名板は必ずしも金属名板を封じ込まなくとも、紙印刷

を代用してもよい。また有機ガラスそのものに文字を型押しにすることもできる。あるいはまた普通の金属名板に最近実用化されてきた弗化水素樹脂またはエポキシ樹脂の透明塗料を焼き付けて耐食性をもたせたものもある。要するに有機ガラス名板は幾多の欠点はあるが、たとえば傷ついたり、曇ったような場合はその表面を削ることにより容易に更生できる便利さもあるところから漸次使用されるようになってきた。図3.8および図3.9は

有機ガラス名板を取り付けた防食電動機の一例を示したものである。

4. 大容量防食電動機

前項までは、中小形の低圧電動機を主として述べてきたのであるが、大形、高圧、あるいは巻線形電動機においてももちろん前述のような防食対策が講じられている。

大形外扇タイプの電動機では冷却効果を増す必要から図4.1および図4.2に示すように銅冷却管付構造などを採用することになり、200 HP 程度以上になるとフレームも銅板溶接構造となる。またさらに大容量のものは閉鎖通風形構造を採用する場合もある。銅冷却管は二硫化炭素や亜硫酸ガスに犯されやすいからステンレススチールパイプを使用すればよい。

表 4.1 大形防食誘導電動機製作経歴表

納入先	出力	回転数	台数	用途	形式
モンサント化成	30kW	900	2	ナマシヨポンプ	外扇形
北日本製紙	50HP	1,500	2	"	"
旭硝子	40HP	1,200	2	ボシブ	"
三菱化成	40HP	1,200	2	混炭機	"
"	40HP	1,200	1	コンベア	"
"	40HP	1,200	3	"	"
"	50HP	1,500	2	消冷水ポンプ	"
"	30HP	720	1	周波数変換用	"
"	35kW	1,800	2	ブロワ	"
"	50HP	1,800	2	誘磁駆動用	"
旭硝子	35HP	720	3	ボシブ	"
三菱化成	75HP	1,800	2	冷却水ポンプ	"
神島化学	100HP	1,200	1	レイモンドミル	"
帝国化工	100HP	1,200	1	レイモンドエキゾーストファン	"
三協機戸	100HP	900	3	推進器用	"
住友機械材	100HP	1,200	5	"	"
三協機戸	250HP	1,200	2	冷却水ポンプ	閉鎖通風形
三菱化成	350HP	1,800	2	ブロワ	"
"	550HP	1,800	2	ガスブロワ	"
"	250HP	1,800	1	"	"
"	350HP	600	1	鋼液循環ポンプ	"
"	350HP	600	2	"	"
"	350HP	600	2	"	"
帝国化工	250HP	450	1	レイモンドミル	外扇形
東海硫安	400kW	3,600	1	ブロワ用	"

図 4.1 帝国化工納 250HP 3,300 V 60 c/s 16 P 450 rpm レイモンドミル用外扇形防食電動機(銅冷却管採用)

Fig. 4.1 External fan type corrosionproof motor for Raymond mill.



図 4.2 東海硫安納 400 kW 3,300 V 60 c/s 2P 3,600 rpm. ブロワ用外扇形防食電動機(銅冷却管使用)
Fig. 4.2 External fan type corrosionproof motor for blower.



図 5.1 特殊防食形電動機 20 HP 4P

Fig. 5.1 Special corrosionproof motor.

5. 特殊防食電動機

電動機がまず腐食され始めるのは多くの場合、酸やアルカリの高湿蒸気や液粒が常時飛散しているような非常に苛酷な外部条件に露出されたボルト、ナット、ワッシャなど鋼材部品からである。これらの部品は後述のような防食処理が施されているが、さらに使用工場の特殊条件によってはこれら鋼材部品をすべて沈めてしまって防食バテで外部腐食物質から遮断する構造を取ることができる。このような構造の電動機では、たとえば一度すえ付けると長時間にわたって分解手入れが困難な場合、あるいはきわめて腐食性の強い物質が存在する場所などに使用して便利である。図5.1は埋込式防食電動機の一例である。

6. 耐アルカリ専用電動機

上述の防食電動機は一般の酸、アルカリ、その他の腐食性液噴霧蒸気、ガスなどの存在する場所に長期間にわたって十分使用できることを条件としているが、アルカリ性物質だけ存在する場所に専用を使用する場合は、耐アルカリ電動機を製作することができる。この電動機にはさらにつぎのような特長を付加することができる。

(1) 電動機巻線にポリビニールホルマール絶縁電線を使用する。これによって巻線の耐アルカリ性を増大するとともに電線の仕上がり外径が小さいため電動機の特性を良好にし温度上昇を下げることができる。

(2) 巻線の絶縁含浸ワニスの選択により耐アルカリ性を増大させることができる。

耐アルカリ電動機は使用電線ポリビニールホルマールがその組成上現在市場にあるものは或る程度の酸(たとえば硝酸、塩酸、蟻酸など)に対して幾分化学的に不安定であるからこの程度の薬品工場に使用するの是不向きである。ただし硫酸工場には使用できる。

7. 耐尿素専用電動機

尿素自体の腐食性についてはなお研究の余地を残しているが、潮解性を有するため、電動機内部に湿気を呼び絶縁ならびに防食塗装を老化させ、不測の事故を起すことがある。すなわち尿素工場向けの電動機としては普通の防食処理のほかに、防湿構造とする必要がある。ある事故例では、ファン側モータカバーにはなはだしい発錆を

その対策として

(2) ブラケットの下部に水抜穴を設け、定期的に堆積物を抜き出すようにした。

(4) 塗装は現在入手できる最高の塗料を選び入念な処理を施した。

8. 屋外用防食電動機

屋外といえども、化学工場などではなおかつ腐食性ガスにさらされるから、防食構造を必要とする上に、さらに防水処置が必要になる。したがって屋外仕様としてつぎの構造をとっている。

(1) 軸の貫通部に両側とも水切りをつける。

(2) わくと軸受、ハウジングカバーなどのはめ合部には防水塗装を施し、端子箱とわくおよびカバーの間にはそれぞれ合成ゴムパッキングを入れる。

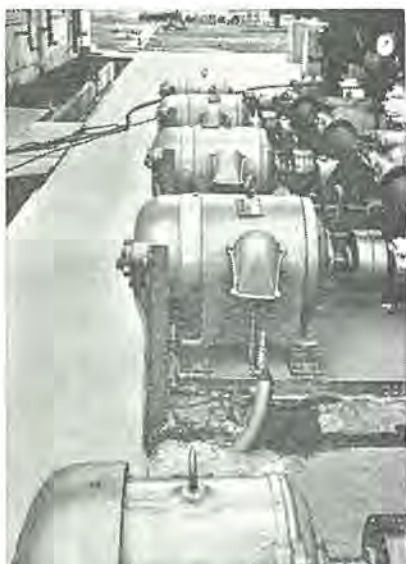


図 8.1 屋外形防食電動機の使用状況
Fig. 8.1 Operating state of outdoor corrosionproof motors.

(4) 絶縁は耐水ワニスで仕上げる。

(5) 大形機にはスペースヒータを内装する。

(6) 特殊の屋外用塗装を施す.

構造面からの防食対策については前項までに大体述べたとおりであるが、いかに構造を完璧にしても、腐食性物質にさらされる以上腐食は避けられない。すなわち上記の構造に加えて金属表面の防食塗装が十分でなければならない。

9.1 塗裝保護膜

(1) 前処理として、わく、軸受、外扇、外扇カバー、端子箱などのような鋳鉄部品は、十分に砂落して、タンブラサンドブラストにより下地仕上げを入念に行い、100°C 以上の空焼きをして、ボンデライズ保護層を作る。

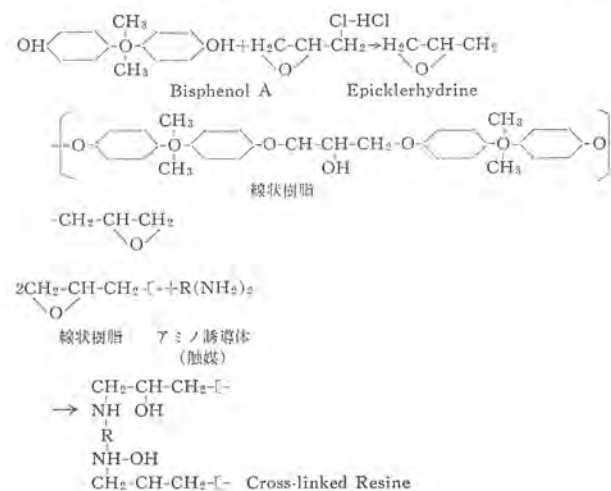
(3) 機工後ふたたび上記の防食塗料を焼き付け、中塗りをしてカシュープライマ焼付を終る。

(4) さらにその上にエトキシ樹脂塗料を焼き付けて上塗りとする。

(5) かくして総組立後、エトキシ樹脂タリヤを焼き付け仕上げ塗装を行う。

このようにして、あらゆる腐食性物質に対してきわめて強力な抵抗力を持つ防食被膜層を形成する。

上記エトキシレジン（エポキシレジンともいう）は
Epoxy, Araldite, Orga 1000, million 10 などの商品名
で市販されているが、つぎの構造式から見られるように



ビスフェノール A とエピクロロヒドリンを縮合させてできる直線状樹脂である。上式に示すようにアミノ誘導体を触媒として使用しクロスリンクドドレジンになり強靱な皮膜を形成する。Reactive Solvent として glyciolylic allylether を用いるとソルベントレスバーニッ

シのようになる。これは防食性きわめて高く透明ワニス、エナメルとして市販されている。その特長は

- (1) 金属に対する接着性が非常に良い
- (2) 耐摩耗性が大きい
- (3) 耐薬品性(酸、アルカリ、油、水、溶剤に対して)きわめて強い。

最近、米国においてもっとも優秀な防食塗料といわれ主として各種金属材料の防食用、絶縁ワニス、薬品タンクのライニング材料、塩素、塩酸、リン酸、サラシコ溶液などを取り扱う装置に使われている。現在われわれが入手できる防食塗料としてこのエトキシリンレジン是最高的ものといえよう。

エトキシリン樹脂は構造上から見て炭素-炭素結合とエーテル結合を有している。このエーテル結合はフタル酸樹脂などの有するエステル結合よりも化学的に強く、またこの樹脂がもっている極性は被覆物に対する密着性をいちじるしく大にしている。このために密着性、可撓性、耐摩耗性、耐薬品性において、今までの合成樹脂塗料よりはるかにすぐれた性質を示している。また光沢美観の点においても優秀である。

9.2 巻線絶縁ワニス

巻線した固定子は予備乾燥の後、サーモセツトワニスにドブ漬乾燥する。コイルの内部までワニスが完全に浸透し、空気や水分のポケットを残さぬように、ワニスの粘度、乾燥温度および時間は厳重に管理されねばならない。またコイルおよび鉄心の表面は耐湿耐食性のきわめてすぐれたこのワニスの厚い層でおおわれる。前項において述べたように、ダイアレジン処理を施せば申し分がないのであるが、経済面から全電動機に適用するわけにはいかない。

9.3 鋼材部品のメッキ

取付ボルト、アイボルト、ナット、ブラッグおよび鉄平ねじなど鋼材部品の外部露出部分はもっとも弱点となり、これらの発錆腐食から本体の腐食に波及することが多い。したがってこれら鋼材部品は金属メッキを行っているが、そのうち銅またはカドミウムなどの十分な下地メッキの上にニッケルメッキを施すのがもっとも実用的である。メッキ層にピンホールのないことが肝要であることはもちろんであるが、メッキの厚みは少なくとも1ミル以上なければ防食効果は期待できない。鋼材そのものに高級なステンレススチールを使用する場合もあるが、いずれにしてもメッキ層だけで恒久的な防食を行うことはできない。したがって標準防食原動機および開閉器は上記のようにニッケルメッキを施し、さらにその上にエポキシ塗料の焼付を行って耐食性を増加している。

なおきわめて苛酷な条件下に使用される場合には、こ

れらメッキ部品をさらにすべて防食コンパウンドで埋込んでしまう構造にして根本的に腐食の問題解決を図る場合もある。

10. 配電盤器具および制御器

電解室の近くに配電盤室が設けられた工場を多く見受けるが、かかる工場配置のところでは、ほとんど制御器類が腐食している現状である。塩素ガスの浸入から完全に隔離することが望ましいのであるが、立地条件、運転の合理性や経済的方面から制約されて、一既に隔離できない場合もあるかと考えられる。まずこれらの工場では、なるべく頻繁に清掃をくりかえすことが肝要であるが、配電器具、計器、制御器などについても一応の防食対策がたてられなければならない。

計器、継電器類は合成ゴムパッキングを完全にすればまず心配はない。問題となるのは開閉器、制御器類である。また取付金具、ナット、ボルトなどの腐食が目立つのであるが、これらは前項にも述べたとおり、ニッケルメッキを施し、さらに必要であれば、エポキシ塗料を焼き付ける。腐食性ガスにさらされる鋼材には、シリコンオイルを塗布または焼き付けると防食性を増大することができる。開閉部分は油漬けにするのも一つの方法である。

配電盤の盤面自体は前記の防食塗料を使用して塗装を入念に施し、ピンホールを作らないように心がけねばならない。

11. む す び

筆者はここ4、5年来、多くの化学工場や化繊工場その他腐食性ガスの発生する工場を多く見る機会を得たのであるが、はたして腐食性ガスの濃度がどの程度のものであるか知らない。また知ろうとしても容易に教えてもらえない。したがって腐食性ガスの種類とその濃度に対する電気機器の根本的耐食研究が実状に伴っていないのではないかと懸念している。推定濃度の何倍かを対象として研究すればよいようなものの、製品価格がかさむのは当然で果して実用になるかはなほ疑問である。亜硫酸ガスによる整流子の黒化防止も気休めの処置しか施されていない。防食問題はただひとりメーカの研究課題でなく需要家の協力なしには達成できないものである。

本文では主として防食電動機に関し、現在実施している方策について、きわめて概念的に述べたのであるが、読者諸氏のご参考になれば幸これに過ぎるものはない。

終りに望み、三菱電機長崎製作所片山氏、福岡工場青木氏、研究所石黒氏のご協力を深謝する次第である。

原子力発電所をわが国の電力系統に導入する場合の諸問題

本社 木村 久 男*

Manifold Problems in Introducing Nuclear Power Stations into Electric Power Systems in Japan

Head Office Hisao KIMURA

Nobody doubts that nuclear power generation concerns with the future of Japan a great deal. All parties connected with electric power industry are trying hard in earnest to bring the matter into practice. Introducing nuclear power stations into the present electric power system needs no special care electrically. But as to the maintenance and operation, manifold problems arise; a countermeasures against probable damage of plant by earthquake, incapability of repair and radioactive injury stand out among them. Generally speaking, it is necessary to make this new power source thoroughly known to public before the materialization of the projects.

1. ま え が き

原子力発電の問題は、わが国の電力問題に関係しているものにとって、非常に重要な問題である。原子力発電所ができた場合に、これをわが国の現在の電力系統に結び付けるといことを考えて見ると、いろいろな問題点があって、それらの検討が十分になされなければならない。そこでこの問題について、ここ数年來考えていたことを、ここに提起してみたいと思う。

図1.1はヤンキー原子力発電会社の134,000kWの原子力発電所の鳥瞰図で、中央右側に見える丸いタンクが原子炉の部屋であって、その手前に屋外用のタービン発電機が見えている。その他の建物には、制御室などが現われているが、このヤンキー発電所は、最近建設がどんどん進んで、ここに示した図面は、最近の設計に基づくものである。

そこで、問題となる幾つかの点を、簡単に述べて見ると、まず第1は、立地条件である。この立地条件は、普通の火力発電所ないし水力発電所と同じような程度の困

難さでもって、わが国の立地条件が得られないとするならば、経済的にも非常に不利になるし、あるいは逆に補償などのために、全然原子力発電所がなりたないというような場合も考えられるのである。これは非常な問題であって、まず第1に原子力発電所を建設する場合に、解決しなければならない問題である。

そのつぎは、原子力発電所はすでに経済ベースに乗ったとか、乗らないとか、いろいろいわれているが、この経済ベースということは、現在の水力、火力の発電所においても、経済ベースに乗っているか、乗っていないかということは、非常にむずかしい問題である。とくに原子力発電所のように、その燃料特性が、十分わかっていない現状においては、経済ベースのごときはほとんどわかっていないといってもよいのではあるまいか、これはあとで、経済ベースなるものの意味について、若干の例をあげて述べて見たいと思う。

そのつぎに、わが国としての特別の条件は、地震が頻発しているということであって、小さな地震は何と日に50回も起きているとのことであるし、大地震は50年に1回起る可能性があるということである。したがって地震に堪えられないような構造のものは、わが国の場合においては、原子力発電所としての立地条件が満たされないという点で問題があると思われるのである。

さらに原子力発電所の劣化ということに問題がある。劣化ということは、水車や火力のタービンとか、発電機でも当然起る問題であるが、これらは取り替えるとか、修繕が可能であるけれども、原子力発電所においては、特殊な事情があって、いったん劣化したものは取り替えることができないものがあるのである。この点についても論じて見たいと思う。

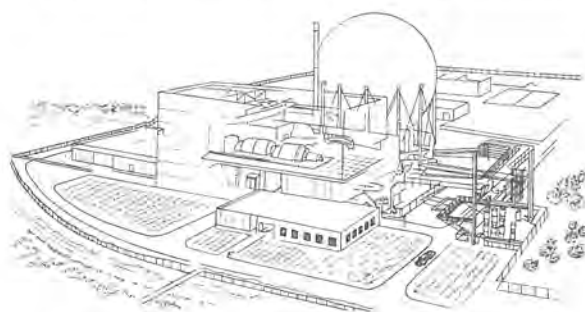


図1.1 ヤンキー 134 MW 原子力発電所外観図

Fig. 1.1 View of Yankee Nuclear Power Station 134 MW

つぎは、修理不可能という問題である。原子炉は放射能の中性子を初めアルファ線、ベータ線、ガンマ線、というような、いろいろの放射線が出て来るために、それらが人体に非常に悪影響があるということから、或る場合には、原子炉なり原子力発電所に手が付けられないような事態の発生が予想されるのである。こういうことは従来の水力なり火力発電所においては、全然考えられもしなかった問題であるが、この点についても触れて見たいと思う。

つぎは放射能災害の問題であるが、これは今日まで、非常に広く研究が行われているので、簡単にはいい現わせないが、原子力発電所としては、最低限度どういうふうにすべきだという点については、いろいろ議論があるが、この問題については、具体例を 2, 3 あげて説明をしたいと思う。

つぎには原子力発電所の危険性と安全性の評価の問題である。危険性というのはすなわち安全性の逆であり、安全性というのは危険性の逆であるとして、一応考えられるのであるが、この点について、いままでいろいろ討議されてきたことを、ここにまとめて、私の主観をも加えて、現在の原子炉について、その危険性と安全性を数字上から比較して評価して見たいと思う。

つぎにタービン発電機の振動の問題であるが、この問題は非常に複雑であって、従来の比較的小形のタービン発電機においては、割合にこの問題は起っていなかったのであるが、最近おいおい大容量になるにつれて、振動の問題が大きくクローズアップされてきたように思われる。

さらに周波数制御の問題があり、欧米では自動周波数制御をやって、大体 0.1 サイクルくらいしか変化しない。日本の場合は周波数制御が十分にいていない。この点についても述べて見たいと思う。

それから電力系統は、1 カ所の事故で電源負荷共無停電になるという方法として、ループ送電の方法があるのである。さらに 2 カ所以上の事故でも無停電にするという方法としてはネットワークの方式にまで、電力系統は進んでいるのであるが、電力系統に原子力発電所をつないだ場合、系統構成の違うわが国でどうなるか、この点も原子力発電所の建設とからみ合わせて検討を要する。私は数年前からこの点を指摘してきたが、もう一度繰り返して述べて見たいと思う。

以上は私がこれからやや詳細に申し上げて見たいと思う問題の要点である。

2. 立地条件

2.1 概説

わが国の原子力というのは、広島や長崎に原子爆弾が投下されたことによって、大きくクローズアップされ、原子力といえばつねに危険の伴うものだという概念が非常に強い。これはまったくやむを得ないところであるが、爆弾の危険というものは、大体二つに分けることができ

て、爆弾の一番大きな危険性は、爆発による機械的なショックで、第二は原子爆弾の残した放射能の災害である。

ところが、原子力発電所というのは、そこで使っている原子燃料の組成からいけば、爆発することはできない範囲のものを使用するわけであって、これを逆にいえば、原子力発電所の燃料そのままでは、それをいかなる形に組み上げようとも、爆弾としては使えないものであるということが、理論的にも実験的にも明らかになっている。

しかし原子力の強大なるエネルギーを、発電の目的に使うために、原子力発電所はいろいろ危険性のあるものを、われわれ技術者達が、実用上まったく危険のないような状態にまで到達させたかということ、一般に認識してもらう必要があると思う。それには Public relation すなわち PR 運動を十分に行わなければならないのであって、技術者の努力によって、原子力の危険が克服されて、実用上さしつかえない程度の、安心なものになったとしても、それを一般の人に認識してもらう PR 運動に失敗したとすれば、原子力発電所をわが国に建設するという目的に対して、一つの大きな障害になるわけである。したがって一般の人に、こういうことを良く説明し、PR するということは、われわれ技術者に課せられた、もっとも重要な仕事の一つではないかと思われる。もしこの PR に失敗したとすれば、わが国においては、原子力発電所の建設は、まったく不可能なことに追い込まれるわけであるが、これに全力をあげても、なおかつ一般の人の認識が得られないとすれば、これも国力の一つであって、わが国において金がないとか、技術がないとかいうことと同じ意味の国力の一つとして、PR の失敗によって原子力発電所が実現できなかったというような結果になるわけである。したがってこの PR ということは、全力をあげて、一般の人が危険であるという気持ちに対して、納得のいくような説明をする必要があると思うのである。

3. 経済ベースの問題

原子力発電所の発電原価が、すでに火力発電所の経済ベースに乗っているとか、乗っていないかという研究は、非常にむずかしいものであるが、これに対してすこぶる簡単に説を唱えられる方があって、私どもとしては誠に理解に苦しむところである。原子炉の構造材料とか、タービン発電機とか、熱交換器とかいうものは、一応現在までの知識で見積りはできるのである。私が一番わからないのは原子燃料の経済問題である。原子燃料の経済というのは、これは原子爆弾とからんでいるために、アメリカにおいても、イギリスにおいても、秘密の部分があって未発表のものが多く、はっきりしたことは全然知らされていない。濃縮ウランを使うアメリカの PWR とか BWR というようなものと、コールドハーローのような天然ウランを使う原子炉とでは、どちらが経済ベースに乗るかというようなことが、最近非常に問題になっているが、この点についても非常に疑問があるのである。

まず燃料であるが、これは今後わが国においても、原子力発電所を建設していく場合に、その燃料がなくなってしまうのは、発電所は発電しないということはいうまでもないが、燃料の入手のしやすさと、将来も継続して入手できるかということの見通しについて問題があるのである。天然ウランというのは、なるほど名前は天然ウランではあるが、天然自然に、コールドーホールの燃料に入れられるようなウラニウムが存在しているのではなくて、零コンマ何パーセントという含有量のウランの鉱石から精製して、その中の不純物を取り除いて、純粋なウランの金属にするわけであるが、そういうできた天然ウランは原子爆弾にも使われるが、原子力発電所として、もっとも有効な U-235 が、0.7% 含まれているということである。わが国ではウランの鉱物から、まだ工業的には金属ウランは作られていない現状である。

それで天然ウランだから入手しやすいとか、濃縮したら入手しにくいとかいう議論が日本で戦わされているが、この点について U-235 の所要量から批判してみたいと思う。U-235 は、濃縮装置のある場所においては、その絶対量が非常に有用であって、濃縮率ではないのである。ところが濃縮装置のない日本などでは、濃縮したものが非常に入手しにくい。アメリカなどにおいては濃縮装置があるために、U-235 の絶対量が有効であって、これが物をいうのであって、濃縮率はその濃縮機に掛けさえすれば、幾らでも濃縮することができるために、濃縮率それ自体は、天然ウランであろうが、濃縮ウランであろうが、あまり問題になっていないようにも考えられるのである。これは単に供給量からいくと、ほとんど問題になっていないという理由は、このウランの値段が、濃縮率によってあまり変っていないで、絶対量のウラニウムのグラム当りの値段が、少しずつ濃縮率によって変化することからもわかるのである。すなわち表 3.1 に示したように U-235 が、0.72% はいったというものは、非常に軽濃縮のウランであるが、これがキログラムあたり 40 ドル 50 セントと出ている。これが天然ウランの場合には、キログラムあたり 40 ドルであって、あまり差はない。すなわちウラニウムをわずかに濃縮したということとは、値段がちょっと高くなったという程度に過ぎないのであって、一番貴重なのは U-235 であって、0.72% に濃縮した場合には、U-235 はグラムあたり 5 ドル 62 セントだが、それが U-235 の濃縮率が 95% になると、グラムあたり 17 ドル 11 セントというように高くなっているのである。それから U-233 というのは、U-235 と同様に、原子炉には有効なものであるが、U-233 と U-235 の混合したものの値段表は表 3.2 に示されている。この混合したものは Homogeneous Reactor などで使用される。

それからウラニウムが原子炉の中において連鎖反応を示している時に、238 がプルトニウム 239 になるが、そのプルトニウムの値段表は表 3.3 に出ている。プルトニウム 240 というものは、あまり有効なものではなく、プ

表 3.1 濃縮ウランの価格および U-235 の価格

ウラン 235 の重量 (%)	ウラン kg 当りの公式価格 (ドル)	含有ウラン 235 の 1g 当りの価格 (ドル)
0.72	40.50	5.62
0.74	42.75	5.78
0.76	45.25	5.95
0.78	47.50	6.09
0.80	50.00	6.25
0.82	52.50	6.40
0.84	55.00	6.55
0.86	57.50	6.69
0.88	60.00	6.82
0.90	62.75	6.97
0.92	65.25	7.09
0.94	67.75	7.21
0.96	70.50	7.34
0.98	73.00	7.45
1.0	75.75	7.58
1.1	89.00	8.09
1.2	103.00	8.58
1.3	117.00	9.00
1.4	131.25	9.38
1.5	145.50	9.70
2.0	220.00	11.00
2.5	297.00	11.88
3.0	375.50	12.52
3.5	455.00	13.00
4.0	535.50	13.39
4.5	616.50	13.70
5.0	698.25	13.96
6.0	862.50	14.38
7.0	1,028.00	14.68
8.0	1,195.00	14.94
9.0	1,362.00	15.13
10.	1,529.00	15.29
15.	2,374.00	15.83
20.	3,223.00	16.12
25.	4,078.00	16.31
30.	4,931.00	16.44
35.	5,793.00	16.55
40.	6,654.00	16.64
45.	7,515.00	16.70
50.	8,379.00	16.76
55.	9,245.00	16.81
60.	10,111.00	16.85
65.	10,979.00	16.89
70.	11,850.00	16.93
75.	12,721.00	16.96
80.	13,596.00	17.00
85.	14,475.00	17.03
90.	15,361.00	17.07
95.	16,250.00	17.11

表 3.2 濃縮ウラン (U-233+U-235) の価格

重量 % (U-233+U-235)	\$/kg (U-233+U-235)	\$/kg 合計 U
1	6,640	70
5	12,240	610
10	13,400	1,340
20	14,120	2,820
30	14,410	4,380
40	14,580	5,830
50	14,690	7,350
60	14,770	8,860
70	14,840	10,390
80	14,900	11,980
90	14,960	13,460
95	15,000	14,250
100	15,000	15,000

[注] U-233 は Homogeneous Reactor などでも U-235 とともに用いられる。

表 3.3 プルトニウムの価格

% Pu 240	Price \$/gm Pu
0.0	45.00
2.0	41.50
4.0	38.00
6.0	34.50
8.0	31.00
8.6 and over	30.00

〔注〕 1962 年 6 月 30 日まで、それ以後はすべて 30 \$/gm になる。

ルトニウム 239 の中にプルトニウム 240 が混合しているものだが、混合されている割合によって値段が非常に開いているが、これは表 3.3 に示してある。

ウランウムの値段というものは、アメリカでこういうような数字が発表されているが、これは原子爆弾の原価と結び付くために、果して工業的に原子力発電の目的にだけ作るということになれば、こういう値段でやれるかどうか疑問であって、私どもとしては何んともいえないが、一応発表された数字をそのまま信用することとして、話を進めてみたいと思う。

ヤンキー 134,000 キロ PWR の場合には燃料が 25 トンであって、濃縮率は 2.6 %、したがって U-235 は 650 kg 必要である。ドレスデンの BWR の場合には燃料の重量は 50 トンであって、濃縮率は 1.5 % で、U-235 は 750 kg 必要である。コールダーホールの場合には 250 トンの燃料に対して、天然ウランのために濃縮率は 0.7 になり、250 トンの中に 0.7 % 含まれている U-235 は 1,750 kg 必要である。そこでこの数字を比較してみると、PWR 650 kg, BWR 750 kg, コールダーホール 1,750 kg ということになり、U-235 の絶対量からいうと、同じような出力に対して、PWR がもっとも有利だということになる。天然ウランだから入手しやすいとか、濃縮ウランだから入手しにくいという議論は、ここにも疑問を投げ掛けているのであって、U-235 の絶対量については、コールダーホール形よりも、U-235 がわずかに 650 kg で済む PWR の方が入手しやすいのではないかと。アメリカとしては供給しやすいのではないかとということが考えられるのである。

それからつぎは Fuel cycle の問題で、燃料は一度入れたら永久に使えるというものではない。石炭の場合燃やしたらすぐ灰にするというのが、火力発電所などの燃料サイクルであるが、原子力発電所の場合には、フューエルサイクルがはるかに長時間にわたるもので、1 年とか 3 年とか、同じ燃料が使用し得るわけである。ウエスチングハウスの R. L. Witzke 氏は昭和 32 年の 5 月に日本へ来て、いろいろヤンキー原子力発電所の説明をしたが、そのときの Witzke 氏の説の解説を「三菱電機」の昭和 32 年 12 月号に「原子力発電所の発電原価について」と題して、私が発表しているのでご参照願いたい。発電原価を考えた場合、今後もっとも大きく左右されるファクターは、フューエルサイクルの問題であって、一応ヤンキーの PWR というものは 2.6 % の濃縮のもの

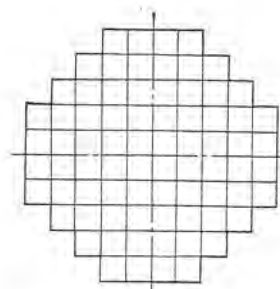


図 3.1 燃料要素 76 組
(Yankee 134 kW PWR の場合)
Fig. 3.1 Fuel elements
76 sets.

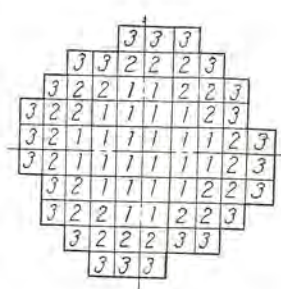


図 3.2 燃料要素 72 組、
24 組×3 領域
Fig. 3.2 Fuel elements 72
sets (24×3 regions).

を 10,000 時間、約 1 年半そのまま使ってから、中の燃料を全部取り替えるということで見積られてあったのであるが、Witzke 氏の説によると、Three regional reloading つまり炉のゾーンを三つに分けてそれぞれのゾーンに濃縮率の違ったものを入れることにするのである。外側の方は放射線が少ないし、中の方は余計燃えるから、結局外側のものを中へ段々ならべ変え、一番外のは結局 20,000 時間炉の中にはいっているような形にして、7,000 時間ずつ使うようにすれば、燃料の費用は非常に安くなる。したがって燃料のインベントリも安くなるし、燃料の有効な使用方法であって、濃縮ウランを使う原子炉においては、きわめて有効な方法であるということの説明したのである。

その説明に準拠して発電原価をひいてみると、Single region loading に比べると Three regional reloading の場合には、発電原価が 3/5 くらいになってしまったのである。

天然ウランの場合ではこういう細工はできないのであるが、濃縮ウランにおいては、リローデングのために、燃料の費用が格段に変化するもので、今後の研究問題として、どういふふうなリローデングの方法を使ったらいいかということ、原子力発電所の発電原価を低下させるために、非常に面白い問題であって、発電原価を低下せうの見込みが、濃縮ウランのほうがはるかに大きいということが、この点からもわかると思う。

図 3.1 は、ヤンキーの 134,000 キロの燃料配置図であって、76 個の燃料要素がはいっている。この 76 という数字は Three regional reloading にしても、Four regional reloading にしても割り切れないので非常に具合が悪いので、筆者の考察として図 3.2 のような 72 本の燃料要素にしてみたのである。こうすると No. 1 のリージョンが 24 本、No. 2 のリージョンが 24 本、No. 3 のリージョンが 24 本になり、数が同じになるために、初めから挿入する濃縮率を、この三つのリージョンに等分に分割できるわけである。

図 3.3 は、四つに分けて、18 本ずつを同じ濃縮率のものにするわけであって、4 種類の濃縮率の燃料を使うということである。

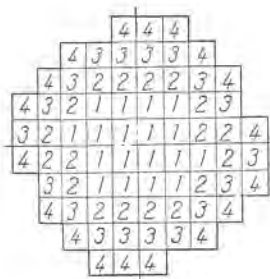


図 3.3 燃料要素 72 組
18 組×4 領域

Fig. 3.3 Fuel elements 72 sets (18×4 regions).

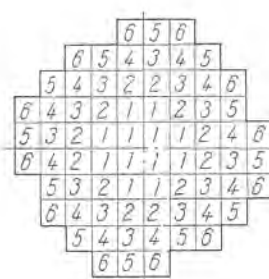


図 3.4 燃料要素 72 組
12 組×6 領域

Fig. 3.4 Fuel elements 72 sets (12×6 regions).

それから図 3.4 は、六つに分けたのであるが、図 3.4 になると、配置からみても、ちょっと不自然な感じがしないでもない。したがって、まあ私の素人考えではあるが、図 3.2 の Three region か、あるいは図 3.3 の Four region くらいが、ちょうど適当ではないかと思われるのである。

しかしながら、こういうふうな Three regional reloading の核計算や熱計算は非常にめんどろな計算を必要とするもので、IBM-704 というような、最高級の電子計算機を使っても、なおかつ 6 ヶ月かからなければできない程度の問題である。つまりこういうふうな regional reloading の optimum のすなわちもっとも経済的条件を見つけるためには、IBM の 704 を使って、6 ヶ月くらいかからなければ、その optimum がわからないというような問題である。そういうことがわかるとすれば燃料費として一番安くなる点が見つかるわけであるが、現在ではまだ一番安いところが見つかっていないということが明らかなのであるから、PWR のヤンキー形発電原価というものは、その最低がわかっていない。

こういうふうな regional reloading の考え方は、ドレスデンの BWR においても行われているし、コールダーホールにおいても、わずかな程度においてこの考え方は採用されているようである。しかしながらわが国においては、この種の核計算、熱計算が、さきに述べたように電子計算機がないために計算できないというのが現状であって、発電原価の正確なところは、どうしても正確な電子計算機に頼らなければつかめないのではないかと考えているのである。発電原価について、経済ベースに乗るか、乗らないかという問題は、燃料の燃焼の仕方や、濃縮ウランの multi regional reloading すなわち多重領域の燃焼方法によって、発電原価というものは非常に変化するものであるから、そういう点を発電原価や、経済ベースを調査する際十分きわめなければならないと思う。この点も、原子力発電所を電力系統に導入する場合、非常に重要な問題である。

4. 地震と劣化の問題

わが国で原子力発電所を建設する場合、アメリカやイ

ギリスと異なった条件が幾つかあることはいうまでもない。まず考えられるのは、地震と原子炉の劣化した場合の問題である。

地震の問題については、PWR および BWR いずれもおもな構造材料は鉄鋼であって、燃料に使われている酸化ウランは、ステンレスあるいはジルコニウムの罐の中にはいっており、罐詰になっているのである。したがって酸化ウランが、たとえ粉になっても、その罐の中で粉になっているので、罐が破壊しなければ全然心配はない。また鉄鋼は、地震とかその他の振動に対しては、問題を起すような部品は使っていない。それで地震の問題だけを取り上げてみると、BWR や PWR は形も小さいし、構造材料がしっかりしているという点で、有利な設計条件を備えているといえるのである。

劣化についてはグラファイトおよび炭酸ガスを使用するものは問題がある。それは次のような式において、グラファイトは腐るのである。すなわち $C (Graphite) + CO_2 \text{ gas} \rightleftharpoons 2CO \text{ gas}$ というような化学反応で、炭酸ガスがグラファイトを腐食するという問題が考えられるのである。この化学反応は低温度域でも進行して Closed Circuit においては平衡に達して進行を止めるものと考えられている。この反応は $400^\circ C$, $150 \text{ lb/in}^2 \text{ g}$ の条件のもとにおいては $0.26\% \text{ CO}$ 濃度で、平衡に達し、またグラファイトは放射線束の照射を受けているので、炉心の部分がもっとも腐食されて、高温の出口または熱交換器に沈着する。

この現象によって、グラファイトの中の CO_2 ガス通路は変形されて、使用に耐えられない時期が到来すると考えられる。

また PWR や BWR の場合は、いかなる場合にも、容器に近づくのに困難はない。どうしても中の燃料を取り出す必要が起れば、圧力容器の内部を全部取り出すことができるような構造になっており、この点まことに有利である。

5. 修理不能の問題

現在の製鉄業においては、スラップを使って製鋼作業を行っている関係上、どうしても CO^{60} が、普通の鋼材にはいつてくる。これはやむを得ない問題だと思われる。そこでたとえば、 CO^{60} の含有量 50 PPM とすると、中性子束 $10^{10} \text{ n/cm}^2/\text{sec}$ で $100,000$ 時間運転した結果、 CO^{60} ができてくるわけであるが、その CO^{60} の蓄積は 1 mc/lb になる。

このような状態になればその圧力容器の側では全然作業ができないということになる。たとえば圧力容器がもしなんらかの故障を起した際には、その修繕ができなくなるということである。1 ヶ月後くらいで許容量スレスレの場合には、時間を限れば近接できるのであるが、それが 10 倍になり 100 倍となった場合には、時間を限定しても、その近所に近寄ることは困難となるために、修理とか保守が全然できなくなるのである。こういうふ

うな近接不能の問題、あるいは修理不能の問題が、いままでの水力発電所や火力発電所には全然なかった難問題である。

つまり人間が作る工業製品において、それがあ期間経過したら事故が起るということは、あるプロバビリティでは、どうしてもやむを得ないのは、いままでの設計の示すところである。その場合には、それに近づいて修繕するということが、普通のわれわれの技術のレベルとしてはいたし方ない状態である。それができないということになれば、これはあまりにも困ったことである。PWRの場合に考えてみると、CO⁹⁹の場合 Carbon Steel の中で、200 Pm, Stainless Steel では 1,000 Pm とすると、30 年間使って大体飽和したときに CO⁹⁹ による放射線レベルは 37.2 r/h でこれは 200 倍という数字が出ている。

いずれの場合も压力容器の側面に近づくことは危険だということになっているが、PWR の場合を考えてみると炉心に近づく際は、その上部に水を非常に高く張って、その水の中で作業をするようになっていいるために、水がある程度あると、この CO⁹⁹ の放射線は非常に吸収されて、相当の近距離まで人間が近づいて、作業をすることができるようになっているのである。PWR や BWR はふたの開閉を人間が目で見ながらやることができるのである。水を張ることによって、30 年使ったあとの、非常に放射能の高い压力容器においても、問題なく修理や移動や、加工ができるようになっているのである。

これは発電所の設計の問題にからむと同時に、まず検討される必要があるのである。PWR や BWR は比較的压力容器のサイズが小さいために、移動することも容易であって、周囲に水を張ることも容易であるのである。

6. 放射能災害の問題

常時運転中は、放射能災害は、その運転員や付近の人々に対して、ほとんど影響のないような設計を施すべきはいうまでもないことであるが、事故の起ったような場合とくに問題なのは、燃料のはいつている压力容器の破損したような場合の対策として、放射能災害ということを経考慮しなければならないのである。

それから地震その他の原因のため一次系が破れて、同時に燃料が溶解したとき、分解生成物の放出の問題は、いかなる場合にも燃料が溶解しないように設計が行われなければならないのである。これは詳細な計算と実験が必要であるが、厳密な意味で、いろんな苛酷な条件を重ねてくると、われわれの試算の結果では、燃料が溶けるような状態に立ち至らざるを得ないようなことも考えられるのである。したがって Vapour Container あるいはガスコンテナというものが PWR や BWR には付いている。コンテナがないと一次系が破損すれば、すぐ一次冷却剤が外部に飛び出るわけである。これは非常な問題である。とにかく压力容器に、もう一重カバーを掛けるという意味であるが必要なことと思う。米国で

発表された安全規則によると、コンテナは今のところどうも必要ではないかと考えられているのである。しかし必要か必要でないかは、どの程度安全に保とうかとする設計の条件によって変わってくるわけであるが、私はさきほどから述べて来たように、わが国では非常に原子力の危険ということを神経質に考えているために、アメリカ流の、安全の上にも安全という意味で、コンテナを付けるような設計であるべきだという意見に賛成せざるを得ないのである。

フランスの EDF-1 は 60,000 kW にガスコンテナを付けると発表されているが、EDF-2 の 100,000 kW には付けないことにしたということが最近の調査でわかったが、この点も議論の余地のあるところではないかと思う。米国で発表された “Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accidents in Large Nuclear Power Plant US-AEC, March 1957” という膨大なレポートによると、コンテナのある場合、人間の死傷が起るような大事故の発生割合は、コンテナがない場合に比べて、1/1,000 となっている。すなわちコンテナのある場合とない場合の大事故の発生割合は 1:1,000 ということになっている。こういう数字に基いて議論をすると、非常にものがはっきりしてくる。

それから同じ PWR にしても、容器破損事故においては、結局放射能災害について問題があるようである。

図 6.1 は SHIPPINGPORT の 60,000 ないし 100,000 kW

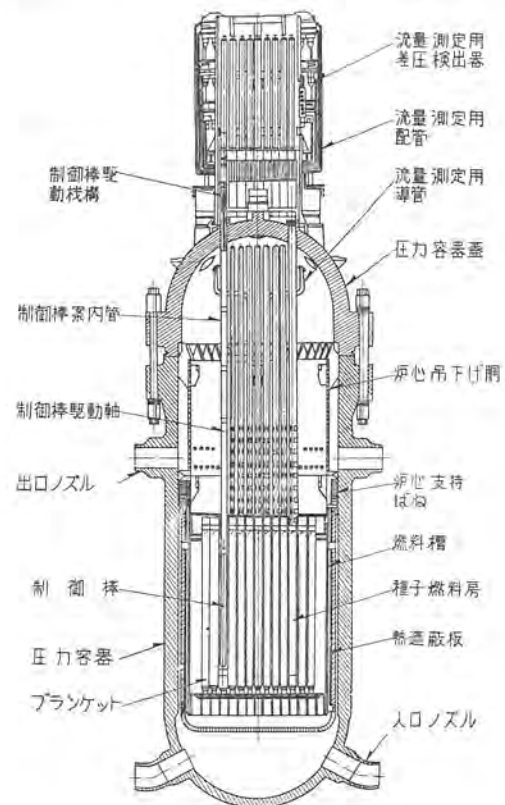


図 6.1 SHIPPINGPORT 発電所 電気出力 60~100 MW 用原子炉 (PWR)

Fig. 6.1 Shippingport plant nuclear (PWR) for electric output 60~100 MW.

原子炉の設計で、この図を見ると、冷却水の入口が下に付いていて、その出口は、この圧力容器の中央から横に出ている。ところが図 6.2 のヤンキー 134,000kW の原子炉の図面では、右の横からはいり、左の方に出口が付いている。すなわち下の方には排管を付けていないのである。こういうふうに設計変更された理由について考えてみたい。 SHIPPINGポートはすでに運転にはいっているし、ヤンキーの原子炉は目下建設中である。こういうふうに横からはいって、横から出るというように設計変更された理由は、つぎのようなことがいわれている。すなわち圧力容器を含む一次系の破損事故が起きた場合は、中の水が外に出るが、そういう場合、安全注入系と称する安全装置が付いていて、これに硼酸水のような硼素を含んだ水溶液を注入するわけであるが、その注入された水が、炉の下の方にはいっていたほうがよいということで、つまり硼酸水がうまく注入されると、炉の連鎖反応が止って、停止状態になるが、停止状態のままで一次系が破損した場合には、災害がきわめて少ないのである。下の方に排管があって、水がなくなってしまうようなことがあると、硼酸水がなくなるために、燃料棒の溶融というような問題が続けて起ってくるわけである。そこでこれを防ぐ意味から、硼酸水はいかなる事故が起っても、

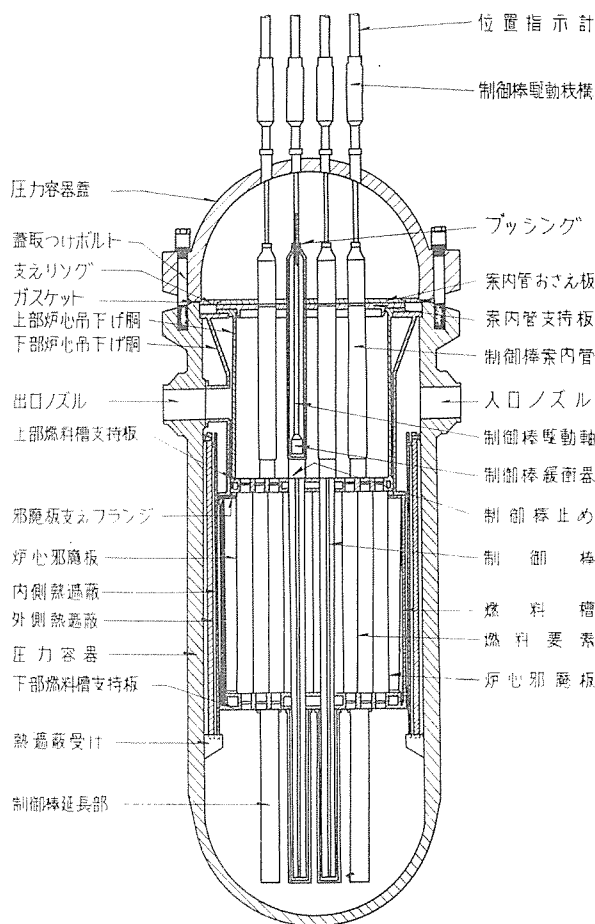


図 6.2 ヤンキー発電所電気出力 134 MW 原子炉 (PWR)
Fig. 6.2 Yankee plant, nuclear reactor (PWR)
for electric output 134 MW

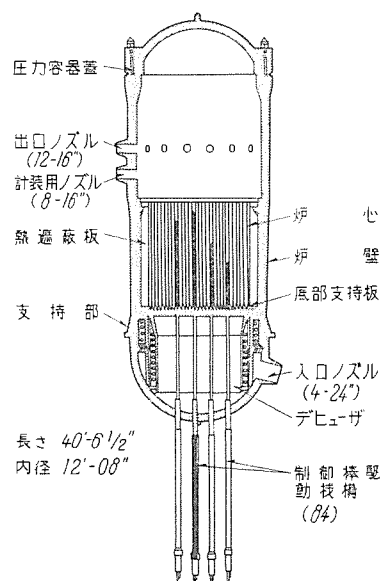


図 6.3 ドレスデン発電所電気出力 174 MW 用原子炉(PWR)
Fig. 6.3 Dresden power plant, nuclear reactor (PWR)
for electric output 174 MW.

いつも燃料をカバーしているような状態に置くことができるようにしておくことから、ヤンキーの 134,000 kW の場合には、図 6.2 のように設計が変更されたものだと聞いているが、水を使う原子炉のもっとも安全な形は、この設計であろうと思われる。

これに対して BWR は図 6.3 に示すようなものであるが、これは Boiling Water Reactor であるから、上部が蒸気になっている。したがって制御の駆動機構も圧力容器の下部からはいっているし、水が下からはいって蒸気が上から出るというふうな構造になっている。これは一次系の事故が起きたときにあるいはまた、コントロールロッドの事故においても、水が全部出てしまうというような問題があとから起るわけである。このことは原子炉の安全性の面から見ておもしろくないことである。つまり SHIPPINGポートをヤンキーのように設計変更したと同じような意味において、BWR は以上のような弱点を持っているようである。したがって PWR よりも安全性において多少欠けるところがあるのではないかと考えている。

7. タービン発電機の振動

タービン発電機も出力がだんだん増加してきて、すでに 200,000 kW 前後のものが考えられているが、原子力発電所の電気出力が、たとえば 100,000 kW とすると、それに使われるタービンは、蒸気の圧力がいまのところ、普通の火力発電所よりも低いために、蒸気の量が非常に多くなるのである。したがってその低圧タービンの翼の大きさは、ヤンキーの場合には 40 インチというような非常に大きな翼が使われているのである。こういうような大きなタービンになってくると、どうしてもタービンの翼の振動の問題がからんできて、設計とそのアプリケーションがたいへんめんどうになって、電力系統につ

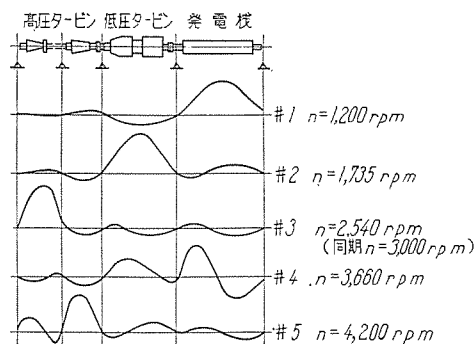


図 7.1 BBC の大形復水タービンのローター限界速度 (BBC Review 1947 より)

Fig. 7.1 Rotor critical speed of BBC large condensing turbine.

なぐということが非常にむずかしくなってくるわけである。図 7.1 は BBC の大形復水タービンの振動の様相を示しているのであるが、振動のモードが、ここに五つ現われているのである。第 1 番目と第 4 番目は、これはおもにタービン発電機の振動であって、これは従来からのタービン発電機の設計者が簡単に計算できる振動の周期であって、No. 1 が 30 サイクル No. 4 が 80 サイクル程度に設計していたのである。この第 1 と第 4 の振動は、いまのところほとんどどの発電機においても問題になっていないと思うが、第 5 はもうすでに周波数が非常に高くなっていて、同期速度よりもはるかに高いので問題ないとして、もっとも問題になるのは、この第 2 と第 3 ではないかと思う。すなわち第 2 と第 3 は、50 サイクルなり、60 サイクルなりの、同期速度の上を取るか、下を取るかということが非常に問題になってくるのである。この BBC の例においてはこれは 50 サイクルマシンで、3,000 回転の機械であるから、第 3 と第 4 の間に同期速度が取られているようであるから、第 2 と第 3 は同期速度より下になっているわけである。

設計上この程度の同期速度が臨界速度から離れていれば問題はないと思われるが、これに近づいた場合、あるいは電源の周波数が変動した場合には、この点が非常に問題になり、タービンブレードの事故というようなことが考えられるのである。タービン発電機のほうは振動の点では問題ないようであるが、タービン側の事故というものも考えられてくるわけである。No. 2 に近ければ、低圧タービンの翼が問題となり、No. 3 に近ければ高圧タービンの翼が問題になるわけである。ところがこの種の計算は、相当高級なアナログコンピュータかデジタルコンピュータを使わないと計算はできないのである。わが国においては、この発電機とタービンを結んで、この種の計算が十分行われていないうらみがあるのである。それで、この点も電力系統に原子力発電所のタービン発電機をつなぐ場合、今後大きな問題になるのではないかと考えている。

原子力発電所をわが国の電力系統に導入する場合の諸問題・木村

8. 電力系統の周波数制御

わが国の電力系統は、戦後電力会社の方々やあるいは電力技術に関係する者が 10 数年にわたって努力した結果、最近の系統は非常に良くなってきた。ところが、まだ改善されていないのは周波数制御の問題である。とくに渇水期には周波数が問題がある。

それで現在の日本の電力系統は、自動周波数制御をやっているところと、やっていないところとある。自動周波数制御はわが国においても、そうむずかしいこともなく、製作可能であるが、周波数の 1/100 サイクルくらいの変動を検知して、それで、その系統のおもな発電所を制御するのであるが、実際は 0.1 サイクルくらいの変動で、いつも治まっている。つまり 60 サイクルの系統は 59.9 サイクルないし 60.1 サイクルで治まるのである。欧米の電力系統としては、それに余裕を取って、0.2 サイクルの巾を持っている。すなわち 59.8 サイクルから 60.2 サイクルの範囲内で使える機械を作って欲しいという要求が出るわけである。それで実際は 59.9 サイクルから 60.1 サイクルで運転するということが、自動周波数制御の最近の常識になっているのである。ところがわが国においては、これが一般化されていないで、もう少し電源開発が進まなければ、こういうことはできないという説もあるようである。それでわが国においてはどうなっているかということ、手動でもって周波数制御をやるが、その場合に裕度が 60 サイクルに対しては 2.5 サイクル、50 サイクルでは 2 サイクルの巾を取っている。すなわち 60 サイクルでは最低 57.5 サイクル、50 サイクルでは最低 48 サイクルまでは、常時の運転の条件である。

ここでタービンの事故例を 2, 3 あげたいと思うのであるが、和歌山県の箕島にある〇〇会社の 5,000 HP ガスタービンのタービン側のブレードの外側の押えの金具に縦割れがはいったのである。また〇〇電力の某火力発電所の 75,000 kW タービンにも同様のことが起った。これはともにアメリカの某社の製品であるため、同社に問い合わせたところ、箕島に対しては 59 サイクル、某発電所の場合は 59.5 サイクルで運転したのではないかという返事が来たようであるが、これはわが国においては当然であって、周波数変動は 57.5 サイクルまでは当然なので、アメリカで 59.9 サイクルでうまく運転している機械を、57.5 サイクルで運転すると、その間タービン発電機の機械的共振点があるかも知れないのである。

これを解決するには自動周波数制御をやれるように電源開発を促進して、59.9 サイクル以下には下がらないように、実際の電力系統を建て直すということである。

原子力発電所の長大なブレードを持つタービン発電機が完成する前に解決しなければならない問題の一つである。

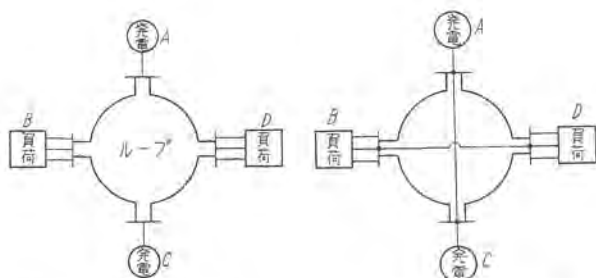


図 9.1 ループ送電方式
Fig. 9.1 Loop power transmission system.

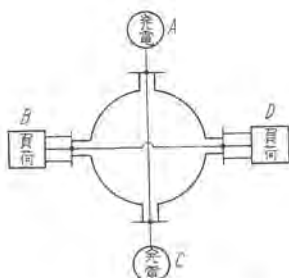


図 9.2 電力網送電方式
Fig. 9.2 Power network transmission system.

9. 電力系統のループ

わが国の電力系統は樹枝状 (Twig-like) であって、受電端から送電線が、えんえんと水力発電所に向かって延びている。それから火力発電所においても、ループ送電の考え方は最近まで実施されなかったのである。送電線は野を越え山を越えて走っているために、雷や鳥や獣類のためにしばしば一線地絡を起すのであるが、そのために発電所が必ず飛ぶということは、水力発電所においても、火力発電所においても、機械としては望ましいことではないのである。それよりさらに困ることは、需要家の負荷に結ばれている送電線が事故を起し、その負荷が停電することである。電力系統を非常に重視する場合には、線路の事故があっても、発電機も負荷も停電しないという方法が必要なのである。それで樹枝状からループ送電の概念が早くから考えられていたのである。ループ送電の方式は、わが国においても局部的にはようやく採用され始めたようであるが、まだまだ全国的に見て、広く採用されているとはいえない。ループ送電のモデルを図 9.1 に示しておいたが、A という発電所と C という発電所との間に B と D という負荷がぶる下がついているわけであるが、AB 間の送電線が事故を起した場合に C から B に負荷が供給されるし、A の発電所は D に供給するために、A も B もともに停電しないのである。こういう無停電方式という系統上の問題が大きく残されているのである。

さらにそれに付け加えて、原子力発電所をこういう電力系統につなぐ場合には、樹枝状の系統ではおもしろくない。少なくともループ送電方式にして、1 カ所に事故が起っても、発電所も負荷も停電しない方式に改善していかなければならないと思っている。この方式は現在アメリカでは、あらゆるところで採用していて、しかもさらに次の章で述べる電力網送電に進みつつあるようである。

10. 電力網 (Network) 送電方式

ループ送電方式が、さらに進歩すると、その電力系統のいかなる場所で 2 カ所が同時に事故を起しても、発電所も負荷も無停電であるという方式が考えられるのであるが、そのモデルを図 9.2 に掲げておいた。これはちょ

うど図 9.1 のループ送電方式に縦横にもう一つあて送電線を結び付けたような、完全に網のような形になるような電力網送電方式である。この場合には 2 カ所同時事故、たとえば AB 間および AC 間が事故を起したとしても、発電機はすべて無停電であり、負荷もまたすべて無停電であるような方式である。つまり負荷に対して、3 方向から送電線がはいっており、発電所も、3 方向に向って送電線を出しているという、そういうような方式にすると、2 カ所同時事故に対しても、無停電で送電を継続することができるのである。この方式はすでにアメリカの大電力網の送電方式においては、すでに採用されていて、とくに原子力の工場においては、こういう電力網の送電方式が採用されている模様である。さらに原子力発電所の場合にもこの方式が考えられていて、原子力発電所は、その電力網が停電すると、発電所の操作にいろいろ支障をきたして、事故の原因とならざるを得ないのであるが、それを回避するために、この電力網送電方式が、発電所の所内の電源に対しても採用されているようである。その電力網送電方式の良いエキザンプルとして、ヤンキー原子力発電所の所内の配電方式があるので、図 9.3 に示しておいた。

ここで図 9.3 を説明をしてみたいと思う。ヤンキー原子力発電株式会社の 134,000 kW 発電所において、もっとも重要な安全注入系 (Safety injection system) の電源供給の図面がこれであって、この安全注入系は原子炉の事故を最少限度に食い止めるために最も重要な補助電源であるが、この系統は 3 カ所から電源が供給されていて、その二つが停電しても、必ず残の一つでもってまかなえるようになっているのである。この安全注入系のポンプは 480 V の電源がつながっているが、そのブスが二つある。それからその上に 2,400 V の所内用のブスがあるが、このブスも二つある。それから主発電機が電力を送出するために、発電機電圧 18,000 V から 115,000 V に上げる変圧器を経由して、115,000 V のブスがある。このブスに対してミルベリーという変電所から 115,000 V の送電線が、1 本来ており、もう一つはハリマンという変電所から 115,000 V が 1 本来ている。それで所内用の変圧器は、この主発電機から 1 台と、ミルベリーの送電線から 1 台と、それからハリマンの送電線から 1 台と合計 3 台の所内用変圧器が 2,400 V のブスにつながっているのである。それでこれらの電源は、一つが停電すれば自動的に生きていくほうにつながるような、自動制御装置が付いている。この程度の系統になると、所内の電源というものは 3 カ所から来ているために、2 カ所同時事故ということはほとんどあり得ないのであるが、1 カ所の事故の時はもちろんのこと、2 カ所の同時事故においても、所内の安全注入系は停電しないという、きわめて高度の電力網の方式を採用しているのである。これに対して、わが国で原子力発電所をこれから建設する場合に、この程度の電力網が得られるかどうか、これは非常に疑問であって、所内からと送電線から取る、

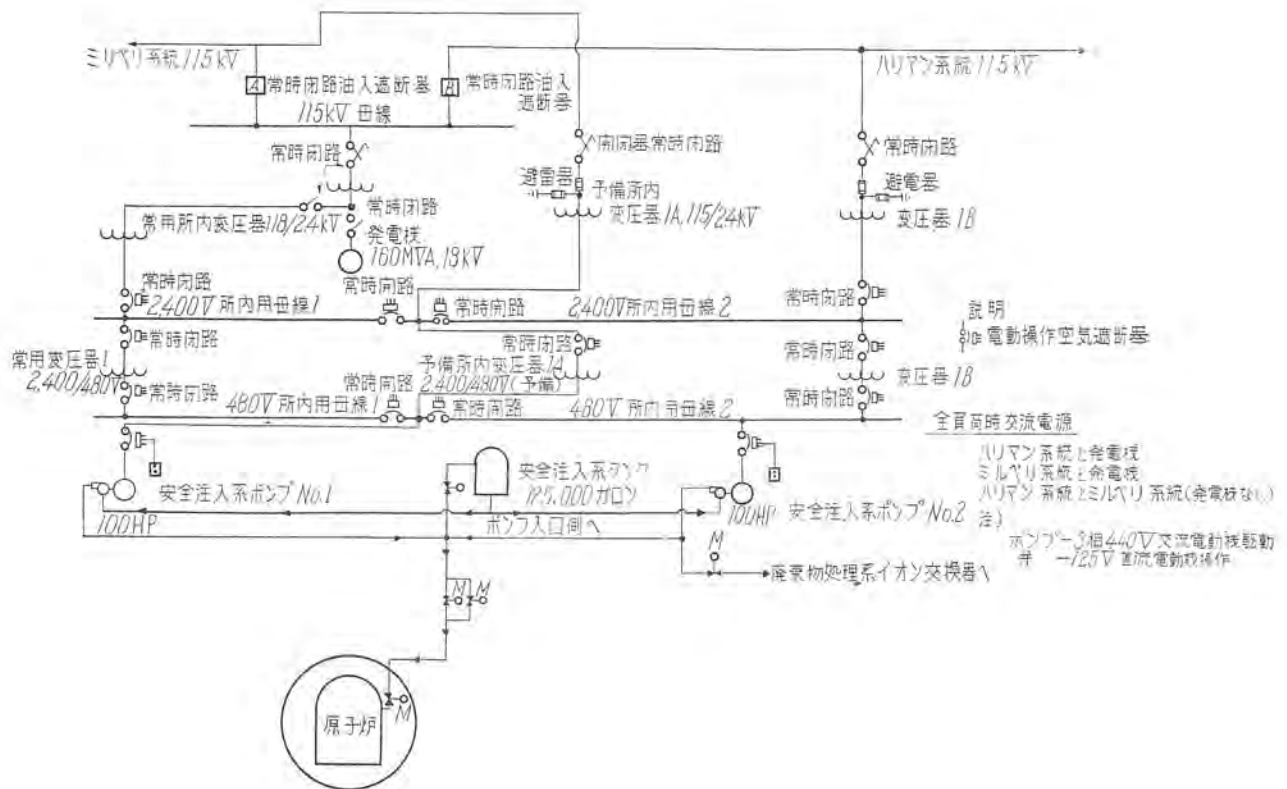


Fig. 9.3 Power source layout diagram of safety injection system of Yankee 134 MW nuclear power station.

2カ所から取るということはできるのであるが、別の方向の送電線から、もう一つ所内を取るということは、現在の日本の送電方式では、不可能の場合が多いのではないかと考えている。このことは、普通の火力の所内用電源についても、大体同様なことがいえるのであるが、しかし原子力発電所の所内はさらに重要であって、事故に対して警戒しなければならないという意味から、こういう電力網方式を取ることが、より良いのではないかと考えるのである。この点でも、わが国の送電網として、まだまだ進歩しなければならない点があるように思うのであるが、アメリカの代表的なヤンキー 134,000 kW の原子力発電所の、所内の配線を例に取って、わが国の動力網の問題点を、一つここでも指摘したいと思う次第である。これも原子力発電所を導入するまでに解決しなければならない、電力系統自体の問題の一つである。

11. む す び

以上いろいろと原子力発電所がわが国に結びついた場合の、諸問題について述べたが、これ以外にもまだ多くの問題が残されているのではないかと考えている。原子炉の構造の問題や立地条件については、原子力発電に関係する者の独特な問題として、いろいろ各方面で論議さ

れているが、電力系統につながるということから考えて、他の電力系統のいろいろな部品、すなわち水力発電所や火力発電所とまったく同じような考え方で、同じ程度の保守の費用で、運転ができなければならないと考えるのであるが、そういう点からすると、地震や劣化や修理不能の問題、それから放射能の障害がコンテナの有無に関係のあることなどを考えて、危険性に対して十分不安のないものでなければならない。

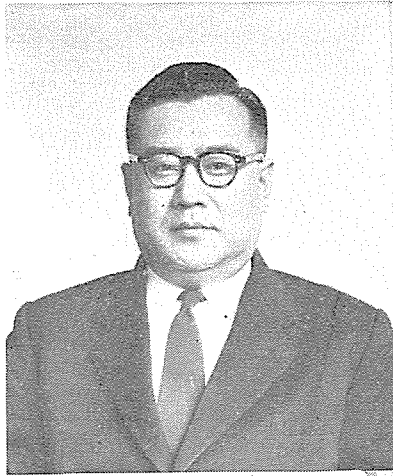
タービンの振動の問題、電力系統の周波数制御の問題、それからループとか電力網の問題は、これはわが国の製造業者と電力会社が協力して、今後系統を改善しなければならない大問題であって、原子力でなくても、これらの問題は、現在までに解決されていなければならなかった問題でもある。いよいよ原子力発電所がはいるとすれば、それまでに系統構成の改善や、機器の設計能力の進歩は今後大いに努力しなければならない問題だと思っている。

最近電力系統の広域運営の審議会などができて、系統構成の問題などは大いに論議されているように聞いているが、これがいち早く実を結んで、原子力発電所をわが国に導入される日の一日も早からんことを望むものである。

第7回「電力賞」の受賞

当社電力技術部長木村久男君は今回電気学会の第7回「電力賞」を受賞した。「電力賞」は電気界のグラン・プリともいうべきもので、同君の光栄はもとより当社もまた喜びとするところであります。

受賞に際して同君からつぎのような挨拶が寄せられております。



「電力賞」を受賞して

電力技術部長 工学博士 木村久男



はからずも去る5月24日、電気学会第7回「電力賞」を授与されましたことは誠に光栄の至りと存じております。これも平素からの皆様のご指導とご鞭撻のお蔭様と誠にありがとうございます。御礼申し上げます。

電力賞を拝受いたしました内容は「送電系統の中性点直接接地方式の推進およびこの方式採用による送電電圧上昇の実施、その他電力系統の改善」となっておりますが、これらの内容にふさわしい業績のまだほど遠いことを恥かしく思っております。

10kVないし60kVの非接地系を変圧器の結線変更だけによりまして、それぞれ17kVないし100kVに昇圧いたしました各地の系統は、その後の運転状態は満足すべきものがあるようでございます。

しかしながら、まだ多くの非接地系や高インピーダンス系が残存しております事実は、誠に小生の非力と浅学なることを示すものとして電力賞に擬せられることを誠に恐縮に存じております。

戦後多くの方々のご努力により送電系統はその改善のいちじるしいものがあり、送電損失や停電回数などもきわめて少なくなりましたのはご同慶の至りでございますが、もう一步の改善は「直接接地」によらねばならないと痛感しております。通信線に対する誘導障害が最少であり、送電系統としてもっとも経済的で、もっとも信頼度の高い直接接地系のよりいっそうの一般化が目下の急務ではないかと考えております。

最近では原子力発電をわが国に導入する模様でございしますが、もっとも信頼度の高い直接接地系を採用いたしませんと、これを受入れることは困難ではないかと思われませんが、この点などにつきまして目下勉強している次第でございします。

終りに臨みまして、電力賞受賞に際しましてのご後援を厚く御礼申し上げますと同時に、今後とも種々ご指導、ご鞭撻のほどをお願い申し上げます。

軸電流の推定

本社 中村 芳雄*

Estimation of Shaft Current

Head Office Yoshio NAKAMURA

The bearing of rotating machine is sometimes so damaged by shaft current as to bring about abnormal temperature rise of the part, wear of bearing metal, contamination of lubricating oil and to go so much as burning the bearing in the worst case. It is hard to suppress the generation of shaft voltage or to check the flow of shaft current perfectly. At any rate, to minimize this trouble through study has been made to get acquainted with real cause of the phenomena. Based on information thus made available, protective measures for the shaft current may be taken at the beginning of installation of rotating machines.

1. ま え が き

回転機器の軸受が軸電流によってその軸受面に損傷をこうむり、それが原因となり軸受の温度異常上昇、メタルの摩耗、軸受油の汚損などを生じ、またはなほだしい時には軸受焼損事故を惹起することは古くから知られているが、その保護対策として軸電圧発生を抑制することおよび軸電圧が発生した場合においても軸電流が流れないように絶縁を施すことが比較的困難なために、過去幾度か事故が繰り返されてきた。

したがってその保守に当っては軸電圧がいかほど発生しているか、その原因が何であるかを知っておく必要があり、またその電圧によっていかほどの軸電流が流れているか、経年的な変化を生じていないかを知ることが望ましい。これらのうち、軸電圧は電圧計にて測定可能であり、その発生原因は各部の電圧分布の測定、またはオシロによる波形の分析によって推定することができるが、軸電流を直接測定することはその構造上簡単にはできないようである。

以下軸電圧の発生原因をあげ、そのうち問題となる軸鎖交交番磁束による軸電圧に対し立て形水車発電機の軸電流値につき推定考察を試みることにしたい。

2. 回転機軸電圧発生の原因

電気の回転機は電気導体と磁性体と絶縁物との組合せであって、それが相対的な回転運動をしている以上完全な構造工作であって理想的な電気磁束の流れを形成しない以上、不必要な起電力が起り得ることは当然なことである。起り得るこれら起電力を列挙すれば次のものがある。

a. 主軸を流れる磁束により発生するもの

これは主として直流機に起るもので軸の残留磁気とか回転子および固定子コイルの導線による one turn 効果によって軸が磁化されその磁束が軸-軸受-軸受台を経て

また軸に帰るといふ磁気回路を形成するため軸受面に沿って軸体内面に起電力を発生するものである。すなわち単極発電作用であるがそれはバックターンにより防止することができるし、また残留磁気によるものは微少であるから大きな問題にはならない。

b. 軸鎖交交番磁束により発生するもの

磁束回路の不均衡により軸に対し鎖交交番磁束を生ずるもので鉄心の割れ目数やセグメント数と磁極数の組合せが不適当なものや、工作上的の不手ぎわ、固定子と回転子間の空隙の不同で発生するもの、コイル溝による磁束の脈動、分数巻電機子巻線による不均一起磁力により発生するものなどがあるが、この内鉄心の割れ目数やセグメント数と極数の組合せの不適当なものにより発生するものが一番問題となるのでこれにつき概説する。

たとえば固定子を2割とし回転子が4極の割合を考える。図2.1のようにN極から出た磁束 Φ は空隙を通して固定子鉄心部にはいり時計方向回転と反時計方向回転に分れる。もし固定子鉄心に継ぎ目がなければおのおの $\Phi/2$ ずつに分れるがこの場合磁極1極対数に対して1割れ目があるため必ずいずれかの方向のものが割れ目を通らなければならない。図のような回転子の位置では反時計方向のものが割れ目を通り、したがって両方向の磁気抵抗に差を生じ時計方向の磁束はより多く流れるこ

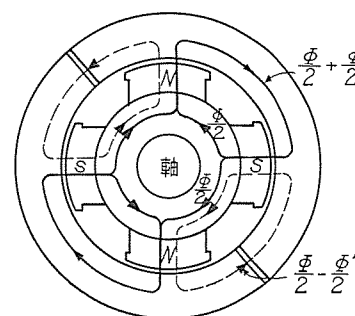


図 2.1 磁束分布

Fig. 2.1 Magnetic flux distribution.

* 電力技術部長

とになる。この両方向の磁束の差の最高時の値を Φ' とすれば磁束の分布は図 2.1 のとおりになる。この場合回転子鉄心部に割れ目がないものとすれば回転子内の磁気抵抗は平衡して両方向に等分に別れ、N 極より時計方向に別れた磁束は固定子内では $(\Phi/2 + \Phi'/2)$ で S 極を経て回転子鉄心に出る時はその磁束のうち $\Phi/2$ は元の N 極に帰り残りの $\Phi'/2$ は次の N 極に達し固定子鉄心に出ることは図のとおりである。すなわち回転子鉄心内部で時計方向に、S 極より N 極に帰る磁束の合計は

$$\left(\frac{\Phi}{2} - \frac{\Phi'}{2}\right) + \frac{\Phi'}{2} = \frac{\Phi}{2}$$

であって反時計方向に帰る磁束と同じになるように磁束は分布する。

この図 2.1 の磁束分布は書き変えれば図 2.2 のようになり等価である。すなわち固定子に割れ目のない場合に比して固定子鉄心をひと回りする磁束 $\Phi'/2$ を発生し回転子の回転につれ磁極が割れ目個所を通過するごとに $\Phi'/2$ の方向は反転し回転子の電気角 1 回転に対し 1 サイクルの交番磁束を発生する。この磁束は軸に対し鎖交するため、軸の上下に起電力を生じる。もし回転子も継ぎ目があればもちろん回転子鉄心内の磁路は磁束の不平衡をきたすが時間的に変化しないゆえ軸電圧とはならないが誘導機においてはすべりがあるゆえ、そのすべりの周波数に比例した交番磁束が回転子内に発生する。これ

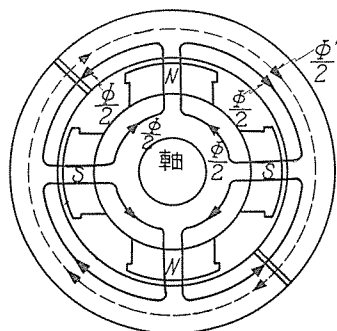


図 2.2 等価磁束分布

Fig. 2.2 Equivalent magnetic flux distribution.

は固定子に発生したものと別個に考え、そのおのおのにより誘起された軸電圧を重畳すればよい。

以上は 2 個割固定子の 4 極機の場合であるが、一般的に固定子の割数と極数との関係より軸電圧の発生を予知する法則は、継ぎ目数を n 、極対数を p とすれば n/p を約分して、その分子が奇数となれば軸電圧を発生し、その周波数はその機械の周波数に、その分子を乗じた数である。

鉄心がセグメント・コアーの場合もまったく同様であるが、ただ突き合わせの継ぎ目でなく互に重ね合わせたものでは、パンチングでは普通対称の位置に鳩目がつくため継目の数がセグメントの 2 倍となるのでセグメントの数を n とすれば $2n/p$ となり、これを約分してその分子の数により定まることは前記と同様である。

約分することは磁極と割れ目が円周に沿って、その相対的位置関係がまったく同等である対称グループの一代

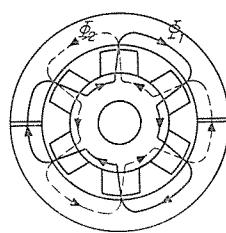


図 2.3 6 極二つ割

Fig. 2.3 6 poles and divisible to two sections.

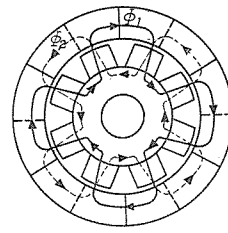


図 2.4 8 極 6 極セグメントコアー

Fig. 2.4 8 poles 6 segments.

表を選出することであり、その一代表の分母の数だけの極対数間に含まれる固定子鉄心内磁路に付いて、時計方向回りの磁路に含まれる総継ぎ目数と反時計方向回りの磁路に含まれる総継ぎ目数とが、分子が偶数なれば同数に分配されるのであるが、奇数なればいずれかの方向のものが 1 個多くなる。それゆえ両方向の磁気抵抗が不平衡となる。

一例をあげれば図 2.3 は 6 極で二つ割の場合であって

$$n=2 \quad p=3 \quad \frac{n}{p} = \frac{2}{3} \quad \text{となり}$$

分子が偶数であるから軸電圧は発生せず、図のように時計方向の Φ_1 と反対方向の Φ_2 とはいかなる回転位置でも各 1 回ずつ割れ目を通り、磁気抵抗は同等であって Φ_1 と Φ_2 とは互に打ち消し合う。

図 2.4 は 8 極 6 セグメント・コアーの場合で

$$n=6 \quad p=4 \quad \frac{2n}{p} = \frac{2 \times 6}{4} = \frac{3}{1} \quad \text{となり}$$

この場合は分子が奇数であるから軸電圧が発生する、図の位置では Φ_1 は 8 個所、 Φ_2 は 4 個所の継ぎ目を通り不平衡となり、その発生軸電圧の周波数はその機械の周波数の 3 倍となる、各磁極が継ぎ目を電気角 1 回転する間に 6 個所通過している。

以上の現象は直流機でも、交流機でも、また誘導電動機でも同様であって、前者は回転しなければ軸電圧を発生しないが誘導電動機は回転磁界があるので始動瞬時回転子がまだ回転を始めない時にでも発生する。とくにこの時は軸受面には油膜を発生していないので大きい軸電流の流れる恐れがあるので運転停止を繰り返すものでは問題となる。

軸電圧は負荷の増減にはあまり影響を受けず、励磁だけに左右される。

c. 静電荷による軸と大地間の電位差

流体や粒子の摩擦運動による静電荷の発生は最近問題となっているが、たとえば圧縮空気の流れるゴムホースの出口、紡織、製紙の工場における帯電、調帯、排炭機などに見られる帯電などその例は多い。タービン発電機では当然その可能性がある。高いものは 100 V 以上にもなるものがあり、蒸気圧の高さ、蒸気の乾燥度などに関係がある。発生も非常に不規則であるが、その軸体に蓄積されるエネルギーは割合に小さいものであるゆえ軸の一部を何らかの方法で接地すれば電荷の蓄積を防止する

ことができる。

3. 軸電流の防止

以上述べたような原因で軸電圧は発生するが、電気機器製造者はその発生が極力小さくなるように、設計および工作面において経済的範囲内で努力はしているが皆無にすることは不可能なことである。このうち一番問題となるのは軸鎖交番磁束により発生する軸電圧であるがその値はきわめて低いもので普通1ボルト以下程度から数ボルト位で、大きくとも10ボルト内外である。しかし軸受を通して回路が形成されれば軸電流となって現われ、時には数百アンペアにも及ぶ。普通大形機にはその回路の一部が絶縁物をもって遮断されているがこれがなんらかの原因で絶縁破壊されたり、導体でバイパスされることがあればその内部のインピーダンスは非常に低いので、大電流が流れ軸受焼損事故を惹起する。

立て形水車発電機にあっては普通推力軸受をささえている上部ブラケット足とステータ・フレーム間が絶縁物をもって隔離されている。また推力軸受金属下側と軸受ブラケット間に絶縁物が挿入されているものもある。かさ形発電機は励磁機支持台の根元にて絶縁されている。

横形に対してはベDESTAL形であればベDESTALの下に、ブラケット形であれば軸受金属の下に直接絶縁物が挿入される。

その他パイピング、配線、温度計リードなど上記の絶縁物に並列にあるものはすべて絶縁されなければならないが中々複雑であり、また水冷管などもあって完全絶縁は相当困難である。これらが古くなるとよごれや吸湿などにより絶縁低下をきたし、また振動により絶縁被覆が破れ軸電流の増加の恐れがあるのでつねに注意をすることが必要である。したがって軸電流防止用の絶縁箇所付近には導体を接触することはもちろん面白くないのであるが、往々にして作業中工具や機器を立てかけて置いたり、気の付かない帯電部（たとえばてすりなど）に作業用電燈を掛けたり、起重機のワイヤーロープを接触させるなどのことが時々あるので十分注意を要することである。それが瞬時であっても軸受面には pitting を発生する恐れが十分あり、たび重なれば軸受面を非常に荒すこととなる。点検解体の際、思わぬ軸電流による pitting や scarring を発生しているのを発見することがある。

軸受面が荒らされれば油膜の形成が悪くなり、軸電流の増加、温度上昇、油の黒変劣化などを生じ、それによってさらに軸電流が大きくなり進行して行くので定期的に簡単に軸電流を測定する方法があればつねに軸受内の状態を監視することができ、また運転員も軸電圧の電位差のある個所を平素念頭に置いていて前記のような事故を未然に防止することができる。

4. 軸電流値の推定測定

軸電流の推定・中村

(a)



(b)



図 4.1 昨年完成した或る新設水力発電所で軸電流によりスラスト・メタルを焼損した発電機

(a) 軸電圧測定中 (b) 修理後

Fig. 4.1 Generator with thrust bearing burnt by shaft current. It is a new machine completed last year.

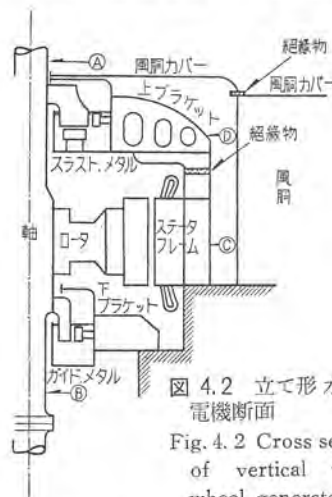


図 4.2 立て形水車発電機断面
Fig. 4.2 Cross section of vertical water wheel generator.

軸を一次とした二つ割鉄心を有する貫通形変流もあるが軸電流が小さい時は測定不能である。昨年或る新設水力発電所において発電機すえ付の際にちょっとした不注意からスラスト・メタルを焼損した事件が起つたので(図4.1参

照),それを修理した際軸電流の確認試験を実施した。その時考案した方法は簡単な推定方法ではあるが割合に確実性があるので以下この方法を記載し参考に供したいと思う。

図4.2は立て形水車発電機の断面図である。極数は18極で固定子鉄心は三つ割である。

$$\text{したがって } n=3 \quad p=9 \quad \frac{n}{p} = \frac{3}{9} = \frac{1}{3} \quad \text{となり}$$

本体と同じ周波数の軸電圧が発生している。

下記点間の電圧分布を測定した。

A点—軸上部(この場合励磁機下の軸露出部)

D点—上ブラケット

C点—ステータ・フレーム

B点—軸下部(水車軸)とすれば

$$AB \text{ 間電位差 } V_1 \text{ (軸上下間の電圧(軸電圧))} = 11 \text{ V}$$

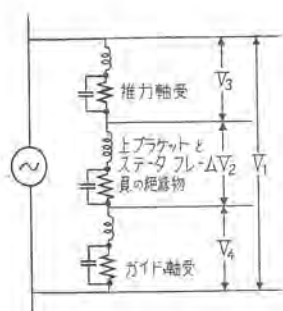


図 4.3 軸電圧等価回路
Fig. 4.3 Shaft voltage equivalent circuit.

AD 間電位差 V_3 (推力軸受にかかる電圧) = 9.5 V
DC " V_2 (上フレームとステータ・フレーム間の絶縁物にかかる電圧) = 0.5 V
CD " V_4 (発電機下ガイド軸受にかかる電圧) = 0 V

注 (A 点および B 点はブラシにて軸をすべらせながら集電して測定した。)

以上の値を得たが推力軸受にかかる電圧はほとんど電圧計指針の変動もなく軸電圧の大半を占めているがこれは軸受面によく油膜が完成されていることを示している。

ここでこの電圧分布の構成を考察すれば、抵抗分布か、静電分布か、またはリアクタンスを含めた分布かが考えられ図 4.3 のような等価回路が得られる。

リアクタンスの影響はこの場合軸電流が非常に少ないために省略できる。静電容量は上記の電圧分布と、上ブラケットステータ・フレーム間の静電容量より考えて静電分はマイクロ F に対し抵抗分はキロ Ω のオーダーであるゆえに静電分布は抵抗分布に比して省略できる。またガイド軸受にかかる電圧はステータ・フレームが接地されているのでこれも省略すれば (実際に数箇所が発電所の実測値は皆 0 である) 非常に簡便化され図 4.4 のようになる。

つぎに図 4.4 のように推力軸受をバイパスするように既知抵抗 R を並列に入れ実際の軸電流を変化させて電圧分布を測定した値は次のとおりであった。

V'	V'_3	V'_2	V'_4
8V	1.3V	6.5V	0V

(注) $R=18\Omega$ を使用した

そこで下記のような簡単な計算式が成立する。

測定 1——スイッチ S を開 (普通の状態)

軸電流を I とすれば

$$R_3 = \frac{V_3}{I}, \quad R_2 = \frac{V_2}{I}$$

測定 2——スイッチ S を閉

この時変化した軸電流を I' とし、 V_2, V_3, R_2 をそれぞれ V'_2, V'_3, R'_2 とし R_3 と R との並列値を R'_3 とすれば

$$R'_3 = \frac{V'_3}{I'}, \quad R'_2 = \frac{V'_2}{I'}$$

しかるに実測期間中は R_2 と R'_2 は変化しないゆえ

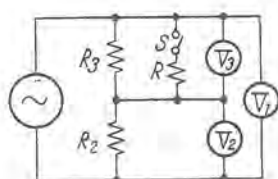


図 4.4 軸電流測定回路
Fig. 4.4 Shaft current measurement circuit.

$$\frac{V_3}{I} = \frac{V'_3}{I'}, \quad \therefore I' = \frac{V'_3}{V_3} I$$

また R'_3 は R_3 と R との並列値であるゆえ

$$\frac{1}{R'_3} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R}$$

$$\frac{I'}{V'_3} = \frac{I}{V_3} + \frac{1}{R}$$

$$\therefore I = \frac{1}{\frac{V'_3}{V_3} \cdot \frac{V'_3}{V_3}} \cdot \frac{V'_3}{R} \quad \text{となる。}$$

この式に前記の実測値を入れれば $I=5.6 \times 10^{-3}$ アンペアなる値が得られる。 R の代りに内部抵抗が 170Ω の電流計を入れて測定し計算した結果電流計にリアクタンスがあるため若干誤差が出たが大体同じ値となった。

ここで注意を要することは、使用電圧計の内部抵抗が R_2 および R_3 に比して相当高いものを使用すべきであり、また低電圧をも正確に読み得るものが必要である。この場合はテスト (内部抵抗 $10,000\Omega$) を使用したができれば真空管電圧計が好ましい。また軸電圧の波形、周波数、および直流分をブラウン管オシロなどで調べられればなお都合である。

R の値の選定については実測の誤差を極力少なくするように選ぶことが肝心である。電圧計の針の振動が激しく読みにくい場合があるが、その時は V_3 は最少値を、 V_2 は最大値を取るようにする。

V_2 が非常に小さくて I の算出が困難な時は、 R の値を種々変化して測定し、相隣れる 2 組より I を算出し、それと R との曲線より判定できる。

なお測定の際には決して R_2 をバイパスするようなことがあってはならない。たとえ或る抵抗値があっても軸電流が数百ミリアンペア以上になるようなことは好ましくない。

5. む す び

発電機のすえ付に際しては、軸電流に対するトラブルが残っていないかをチェックするために、上記の方法によって測定することを推奨することができると思われる。この方法は割合に簡単であり、発電機の励磁を徐々に上昇して軸電流の有無を確認するのに便利である。

運転保守にはいつてからは定期的の実測を行い、経年的変化を常に監視することが望ましい。

もし V_3 の読みの振れが経年的に次第に大きくなって行くようであれば、ちょうど図 4.4 のスイッチ S が接触不良を起して R が R_3 に並列にはいつたり切れたりすると同様で軸受面に pitting を生じていると見るべきであろう。軸受油が異常劣化を起せばやはり R_3 の値が減少し軸電流が増加しているため R_3 の算出をなす。

上部ブラケットとステータ・フレーム間の絶縁が塵埃付着、吸湿などで絶縁劣化をきたしておれば次第に R_2 の減少をたどるので、その時の軸電流と V_2 の測定値より R_2 の算出を必要とする。

点検解体後の運転直前にも新設の場合と同様、必ず確認するようにすべきであると思われる。

最近、筆者が経験した軸電流対策につき簡単にご報告した次第であるが、読者諸兄のなんらかのご参考になれば幸である。

台湾電力における技術的諸問題

本社 木村久男*・山田栄一**・迎 久雄***

Technical Problems in The Taiwan Electric Power Company

Head Office Hisao KIMURA・Eiichi YAMADA・Hisao MUKAE

In the early part of 1958 four engineers came over to Japan from Taiwan and discussed about technical problems in that country with Japanese engineers. The past decade has changed the engineering conditions in the country a great deal. Advisory staff from America is giving guidance in the projects in various fields, which, in a sense, involve not a little new ideas to draw attention of Japanese technicians. Friendly talks with these visitors have covered many technical problems such as a plan of raising transmission voltage, damage by salty wind, extensive use of autotransformers, utilization of wood for insulation, home appliances and other versatile subjects.

1. ま え が き

去る昭和 33 年 2 月から 5 月の間に、台湾電力の技術者が当社その他に調査視察のために来られた。この方々は 10~20 年の経験者であり、かつまたわれわれには戦前の台湾電力の事情はよくわかっていたので、この諸氏と数回技術懇談会を催した結果戦後における台湾電力の進歩の事情をよく伺うことができた。米国系の顧問技師の指導により、ある点ではわが国より技術的に進んでいるようなことも少なくなかった。わが国の電力技術と比較して、台湾電力における技術的の諸問題も伺うことができたので、わが国としても参考になる点が少なくなかったので、本文をまとめることとした次第である。



図 1.1 台湾の送電系統図

Fig. 1.1 Transmission system map of Taiwan.



図 1.2 台湾電力龍洞発電所へ納入した 54,000 kVA 水車発電機の工場試験

Fig. 1.2 54,000 kVA water wheel generator for the Taiwan Electric Power Co. under factory test.

台湾電力の送電系統図は図 1.1 に示すようであるが、島の中央に水力地点があり、現在も開発が進められている。南北両端には相当大容量の火力発電所がある。その間を南北に 154 kV の送電幹線が走っている。そうしてこの幹線の所々で負荷が落ちているが、おもな負荷は南北および中央部の 3 箇所である。

この系統に関しては当社も、まず昭和 7 年頃、5,000 kVA 154 kV サージブール変圧器を多数納入し、今なお、無事故で運転しているが、その他種々の機器を納めている。図 1.2 は最近完成した龍洞発電所に納入した 54,000 kVA の水車発電機である。

われわれが台湾の電力技術に関して、懇談した内容は相当に広範なものであったが、本文で説明するものはそのうちの双方ともに興味の深い問題に限ることとする。

* 電力技術部長 (工博)** 電力技術課長 *** 電力技術部

すなわち、昇圧と送電網計画、塩害、単巻変圧器、木材の絶縁利用、がいしの色、配電方式、柱上変圧器、鉄道電化、家庭電化、農村電化などの諸問題を探り上げることとする。

2. 昇圧と送電網計画

台湾電力における一次送電線路は当初はベコ系であったが、第二次大戦後抵抗接地系に切替えられ、さらに今年6月頃から154 kVの直接々地系に切替えられることになっている。現在一次送電線は図1.1に示すように、日月潭を中心として北は台北まで206 km、南は高雄まで155 km 延びているが、線路は大体容量いっぱいまで来ており、さらに最近中部山岳地帯における水力発電所の開発にともない、送電電力の増加を計るための一時的な対策として現在の送電線および現有設備をなるべく変更することなく10~15% 昇圧することが考慮されている。

この昇圧はどこまでも一時的な昇圧であるので、オートトランスを入れるとか、あるいは鉄塔のがいしを増加するとか、そのような工事は極力さけない意向のようである。昇圧の方法としては、発電機の電圧を上昇させることおよび変圧器のタップを上げる方法が考えられる。変圧器にタップがあれば一段上に切替えると同時に、発電機の電圧を5% 位上昇して使用することにより10~15%の電圧上昇はなんら支障なく可能であるように思われる。

以上はさしあたっての一時的昇圧の問題であるが、5ないし6年後にはさらに大巾の発電量の増加が予想され



図 2.1 台湾の昇圧計画

Fig. 2.1 Planned voltage up on transmission system at Taiwan.



図 2.2 関西電力交流計算盤全景 (三菱製)

Fig. 2.2 AC computation panel for the Kansai Electric Power Co. built by Mitsubishi.

るので、当然 230 kV ないし 330 kV への昇圧も考慮されなければならないことになる。図2.1は将来の昇圧計画であるが、これによると、日月潭を中心として超高圧送電線が計画されているようである。

わが国においても最近昇圧に関する問題が活発に取上げられ、直接接地による昇圧が次々と実現している。今までの例を掲げると次のとおりである。

三菱金属	小又川系	30,000 V → 52,000 V
四国電力	宇和島系	60,000 V → 100,000 V
九州電力	志布志系	20,000 V → 35,000 V
北海道電力	稚内系	" → "

なお最近においては、国鉄信濃川送電線における昇圧が計画され、委員会において目下検討中である。また米国のオンタリオ水力では既設 110 kV の送電線に対してがいしを2個追加して、230 kV に昇圧しさらにそのまま 262 kV で 20 ヶ月運転した実績がある⁽¹⁾。

今までわが国において実施された昇圧方式は変圧器のΔ結線を Y 結線に切り替えて、中性点を直接接地する方式であるが、いずれの系統においてもあらゆる面においてそれぞれ優秀なる運転実績を収めており、昇圧による経済的利益は非常に大きなものと思われる。台湾電力においても、このような方式により、昇圧を実現されることを推奨する。

この問題に関して交流計算盤についても種々懇談が行われた(図2.2参照)。

将来の送電網計画の立案あるいは現在の送電網の合理的運営に関する種々の問題などは、電力会社における System Engineer の重大なる仕事であるが、わが国ではこの面において各電力会社とも欠けていたように思われる。しかしながら近時各電力会社とも交流計算盤が次第に設置され、これらの問題が検討されるようになったことは、よろこばしいことであると思う。台湾電力においても、近く交流計算盤が設置されるとのことであるが、誠に結構な計画である。交流計算盤が送電網の運営上なくてはならない System Engineer の武器であることはいままでもないが、参考までに当社の研究所にある交流計算盤によって去年4月以降実施した計算のうちおもなるものを列挙すると次のとおりである。

- (1) 九州電力苅田発電所の高速度再閉路の問題
- (2) 九州電力の系統の潮流計算
- (3) 関西電力の大阪火力の過渡安定度の計算
- (4) 日本鉄板の 30 トンならびに 5 トン炉による電圧フリッカの問題
- (5) 新東京系統のケーブル系統の地絡時の過電流の問題
- (6) 関西電力における誘導障害の計算
- (7) インドのダングバレーコーボレーションの 132,000 V 系統の直列コンデンサの問題
- (8) 北陸電力の異常電圧の計算
- (9) 高島炭坑の電源問題および直流送電の問題
- (10) 東北電力における直接接地系の故障ケースの計算
- (11) 九州電力、西谷苅田間の HKB リレーの問題
- (12) 関西電力、千日前低圧ネットワークの計算
- (13) 中国電力、新宇部発電所の HKB リレーの基礎計算
- (14) 250 GW 500 形ウオッチケース形遮断器の電位分布および周波数特性の計算
- (15) ケーブル系統における一線地絡時の零相電圧電流の動揺の計算
- (16) 台湾電力の潮流の計算
- (17) 東電 140,000 V 系における避雷器にかかる内雷動作責務の計算

交流計算盤として、最も肝要なことは誤差が少ないということである。誤差の大きな計算盤により計算した結果にもとづき、送電網を計画しあるいは運営するとすればその損害はばく大な額となることは明らかである。その点当社の計算盤は使用周波数も低く、単位電流および電圧も大きく、したがって使いやすく少々手荒に使用してもまた長年使用しても誤差は少なく、一番推奨できるものであると確信している。

この他昇圧を行うにあたって緊要なことは送電線ができるだけ Net work にすることである。わが国の送電線では Net work になっていないために、事故の場合に発電機が無負荷となり、非常に高い異常電圧を発生する例が多いが、米国の BPA などの送電線ではすべて Net work になっていて、いかなる 2 箇所における同時事故が発生した場合においても、スタビリティがくずれることはなく、したがって異常電圧も発生しないような回路が形成されている。このことは台湾電力においても将来送電線路を計画されるに際し範とすべきである。

さらに昇圧に関してはラジオノイズおよびテレビノイズが問題となってくるが、台湾においては超高圧となったとしても、線路が一般に山地を經過しているので、あまり問題になるとは考えられない。なお現在においては、これに関する問題はほとんどおこっていないとのことである。

3. 昇圧の方法

台湾電力における技術的諸問題・木村・山田・迎



図 3.1 四国電力津賀発電所の単巻変圧器
100 kV (60 号)/50 kV (30 号), 10,000 kVA.

Fig. 3.1 Autotransformer for the Shikoku Electric Power Co.

さらに昇圧を行う場合の変圧方式としては次の三つが考えられる。

- (1) 二巻線変圧器
- (2) 直列変圧器
- (3) 単巻変圧器

以上三つのうち、単巻変圧器による系統の連系は欧米においては多くの実績があり、わが国においても、昭和 29 年四国電力において 50 kV/100 kV (1 万キロ) の単巻変圧器が当社において始めて製作され(図 3.1 参照)、目下優秀なる成績で運転されている。単巻変圧器が他の変圧器に比して寸法重量の点ではるかに有利なことはもちろんである。一例として 150/220 kV バンクの寸法重量について二巻線変圧器と比較すれば、それぞれ 32% および 50% 程度になる。

単巻変圧器に対しては、サージが侵入した場合に過渡振動電圧が発生し、避雷器その他による異常電圧防護対策が問題であると一般にいわれているが、シェルタイプの場合においては、進入容量を大きく、サージブーフ構造に製作することができるから、過渡異常電圧が抑制され、二巻線変圧器におけると同様な避雷器を線路端に設置することによって十分であり、端子間のバイパス避雷器は必要ではない。また単巻変圧器を系統の一部と見なして、高圧側の遮断器を除き、低圧側の遮断器だけで単巻変圧器と線路を含めて遮断することも考えられる。

以上のように、単巻変圧器は他の変圧器に比してあらゆる点においてすぐれていることから、将来の昇圧実施の際にはこの変圧器を採用されることを推奨する。

4. 塩害について

4.1 送電線における塩害

台湾電力の送電線は 154 kV 級であって、日月潭を中

心として南北に走り、北は台北の負荷、南は高雄の負荷に電力を供給している。このうち台北線は新竹付近で海岸線近くを通っているため、塩風を受けて塩害を生じ、がいし破損事故が多い。そのため、新竹付近ではがいしの個数を1~2個ふやして事故の発生を防止している。これは台湾電力では塩害によるがいし破損事故を防ぐために長年がいしを研究し、モートル形がいし、鼓形がいし、油入りがいしなど使用したがいずれもあまり成功せず、結局現在はわが国と同じ懸垂がいしを、個数をふやして使用しているものである。台湾電力では、長幹がいしはまだ使用していない。

4.2 がいしの塩害とその除去

台湾では10月末ごろから2月ごろにかけて季節風が強く、しかも大きい雨が降らないという、塩害に対してはきわめて悪い条件となり、がいしに塩が白く付着することがある。その上、この季節には霧の発生が多く、霧雨の後に事故が発生するケースが多い。したがって、霧雨のあとにはポンプによるがいし水洗いを行っているが、水洗後拭いて送電すると、洗う前よりもかえって悪い場合がある。

霧が多く、季節風が強い冬季には、かなり長い区間にわたって月1回送電線がいしをポンプで水洗いしている。しかし風が吹いてがいしに塩塵が付着した後、霧雨が降るというように、非常に状態が悪い場合には、2、3日前に水洗いし拭いたものでも、ふたたび送電できなくなるということが起る場合がある。

台湾でも塩害対策として、がいし、洗浄方法などいろいろと研究しているが、まだこれという良い方法はないようである。

4.3 塩害によるさび

塩害によって送電線、配電線の金具、断路器の金具、ネームプレートなどがさびるという問題も生じている。1箇所さびが発生すると、そこからさびがひろがるという問題があるので、1年に2回くらいずつ塗料を塗ってやらなければならない。しかし、タンク、断路器などは数が多いので、これらのさび止め対策も困った問題となっている。

4.4 遮断器と塩害

台湾電力では、最近がいし形空気遮断器が大量に採用されているが、この空気遮断器が一部で事故を起したということをきいている。がいし形空気遮断器は、がいしを使用する関係上塩害、塵害などを考える場合にその遮断点間の電位分布が悪くなり、遮断特性の低下は免れない。これに対してウオッチケース形節油タンク形遮断器は構造がタンク形であるために遮断点の数を増すことも容易であり、塩塵害の心配も少なく、遮断点間の電位分布も均一に保つことができる。したがって、台湾電力においても塩害の多い地方の発電所には、節油タンク形遮断器を使用されることが望ましい。図4.1は三菱電機で製作している塩害の影響の最も少ないウオッチケース形節油タンク形遮断器の一例である。

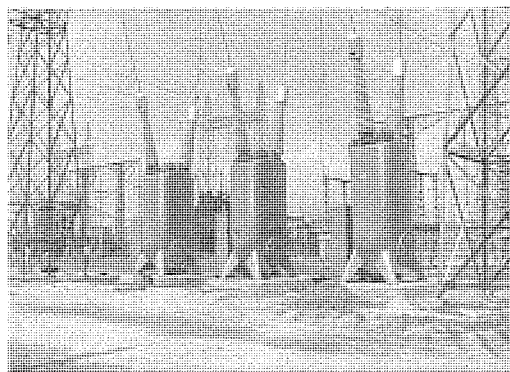


図 4.1 ウオッチケース形方変電所
275 kV O.C.B. (三菱製)

Fig. 4.1 Westinghouse type 275 kV O.C.B. built by Mitsubishi.

5. 送電線における木材の絶縁利用

台湾電力における送電線電圧は、現在154 kVであるが、2章で述べたように、現在の送電設備をそのまま利用して送電線電圧を一割昇圧しようということが計画されている。

すなわち、送電線にはすべて鉄塔が使われているが、一割昇圧を実施する場合送電線鉄塔の腕木を木材として、この木材を絶縁物として利用することによって一割昇圧を実現しようとするものである。

木材使用に対しては、木材の漏洩電流による火災を防ぐために、薬品を含浸させ、絶縁度を高めて使用する。

しかし、送電線鉄塔に木材を絶縁物として利用し、昇圧するという方法はわが国をはじめ世界にもあまり例がなく、台湾電力でも暫定的な方法として考えることはできるが、永久設備としては使えないであろうと思われる。

6. がいしの色

台湾電力で使用しているがいし類は、ほとんどすべてわが国のメーカーより購入しているが、その色はわが国の場合と多少異なっている。

すなわち、わが国ではがいしの色はほとんどすべて白色であるが、台湾では大部分チョコレート色のものが使われている。これは、台湾では現在“防空”ということが重大な問題となっていて、“防空”という見地から白色でなくチョコレート色が採用されているということであるが、同様な見地から、一部山の中では緑色のがいしも用いられているということである。

がいしの色が白い場合には、がいしに生じた傷が目だちにくい、チョコレート色の場合には傷が白く出て、目だちやすい。またチョコレート色のがいしでは、白色のものに比し直射日光による温度上昇がかなり大きく、がいしの膨張収縮が大きい、ひずみの発生に対して不利ではないかということ、台湾電力のほうは考えておられるようであるが、米国で使われているがいしもチョコレート色が多い点を考えると、そこまで考慮する要はないと思われる。

わが国においても、戦時中は“防空色がいし”が使用されたが、現在ではレーダが発達しているから、このようなことはあまり意味がなくなったと考えられる。

7. 配電方式

台湾における配電電圧は、古くは 2,000 V が採用されていたが、最近ではこの電圧は整理されてごく一部に残っているだけである。多くは 3,000 V で一部に 6,000 V, 10,000 V がある。またその他に 5,700 V の三相四線式も若干採用されているけれども、将来は全般的に 6,000 V に切り替えられる模様である。

米国の田舎の配電線において、変圧器のブッシングは 1 本だけで、リターンは大地を使用する配電方式が良く見かけられるが、わが国においても北海道の一部にこの大地リターン方式が採用されている。台湾においても第二次大戦後約 5 年間くらいこの方式で 20 キロメートルくらいの配電が経験されたが、工作物規定の適用などの理由によって取やめとなったとのことである。この方式では誘導障害が問題となるのであるが、台湾においては今のところこれに関してはあまり問題はないようである。また現在の配電線においては、二線接地の場合 CO リレーで何秒もかかって事故を遮断している状態であるが、この方式において瞬間的にリクローザなどを使用して 4 サイクルくらいで遮断するようにすれば、誘導障害の問題も解決できるから、いなかにおける配電には、経費の安いこの方式を採用することも考慮すべきであろう（図 7.1 参照）。

配電電圧を将来は全般的に 6,000 V に昇圧し統一しようとする計画は、わが国の各電力全社においても大体同じような考え方であるが、このような考え方にはちょっと疑問があるように思われる。すなわち、それぞれの地区ごとにそのロードに応じたまたその配電網の状況に応じ、それにもっとも適した配電電圧があるはずであるから、全面的に配電電圧を統一することなく、それぞれの地区ごとにもっとも適した、もっとも経済的な電圧を採用しても一向さしつかえないように思われる。オートトラン



図 7.1 ブッシング 1 本の配電用変圧器

Fig. 7.1 Distribution transformer with only one bushing.

スを採用することにより、この操作は簡単に実行できるであろう。

8. 配電用変圧器およびサーキットリクローザ

8.1 CSP 変圧器

米国においては配電用変圧器として、この CSP 変圧器が全面的に採用されているのに比し、わが国においては、まだ全然使用されていない現状である。台湾においては、現在容量 5~100 kVA のものが約 1,000 台くらい普通の配電線に設置されている。この CSP 変圧器はその過負荷耐量に合わせた熱動要素をもった低圧遮断器が変圧器に内蔵されており、変圧器油の温度上昇に応じて動作し、過負荷による変圧器事故を防止するとともに、万一変圧器の巻線に不完全接地事故があった場合にも、油温が上昇して、この低圧保安器が動作して、警報を発するような構造になっている。台湾における使用実績は、まだ緒についたばかりでありあまりうまく行っていないようである。すなわち低圧の保安器は相当の過負荷でなければ動作することはない、しかし一度動作した場合には、油温が上昇しているので、見回りに行き再投入してやっても、油温がなかなか降下しないので、またすぐ動作するような状況で、需要家から文句が多いとのことである。しかしながら、これは CSP 変圧器自体が悪いのではなく、その使用法が適切でないようである。すなわち CSP 変圧器を取付ける場合には、その地区のロードの状態を前もって良く調査し、それに応じた容量のものを取付けるようにしなければならない。また取付け後、ロードの増大にともない警報がしばしばでるようになった場合には、すぐ一段上の変圧器と付け替えうように予備の変圧器をつねに用意しておくようにしなければならない。今後これが適用につき十分検討されて、CSP 変圧器の機能を十二分に発揮し、運用されることを切望する（図 8.1 参照）。



図 8.1 CSP 変圧器

Fig. 8.1 CSP Transformer.

8.2 サーキットリクローザ

わが国の配電線はまだほとんどが非接地三相三線式の樹枝状であるが、米国においては早くから多重接地三相四線式の環状配電方式が多く採用され、選択区分遮断により除去すべき故障区間を極力局限して、健全区間の停電をさけ、需要家へのサービスを向上させている。

サーキットリクローザはこの選択遮断装置として、ウエスチングハウス社において開発されたものであるが、わが国のような非接地配電方式の所においては、使いにくいために、ほとんど採用されていない。

台湾電力においては、南部地区に相当数採用されているが、割合により運転実績を上げているとのことである。

9. 鉄道電化

台湾の鉄道はすべて国有であって、台北より西海岸に沿って南下し、高雄に至る約 360 キロメートルの路線が幹線となっている。現在電化されている区間はまったくなく、また近い将来電化に着手しようという計画も立てられていないということである。

台湾で鉄道電化が行われておらず、また計画も立てられないのは、現在台湾では電力が不足で重工業負荷に供給するだけでいっぱいであり、鉄道電化までの余裕がないので、将来十分発電所ができて電力事情に余裕が生じたならば電化に着手しようという考え方および、鉄道を電化しても経済的に引き合うかどうかかわからないということが理由となっているという。

しかし、これではむしろ鉄道電化に対する考え方が逆であるように思われる。

電力が不足すればこそ、鉄道の沿線に 1 日も早く熱効率の高い新鋭火力発電所を建設し、その電力によって鉄道を電化し、熱効率がきわめて低く、使用した石炭の熱をほとんど捨ててしまっているような蒸気機関車を運転することは 1 日も早くやめて、貴重な石炭資源を熱効率の高い火力発電に向けて有効に利用すべきであろう。

すなわち、最近の新鋭火力発電所の熱効率は 32~40% に達し、1 基 20 万 kW 程度の発電機も製作されている状況であるのに対して、蒸気機関車の熱効率は依然としてわずか 4~5% にすぎない。したがって沿線に新鋭火力発電所を建設し、鉄道を電化することにより節約される石炭の量は年間ばくだいな量に上る。

将来、台湾において鉄道電化を行う場合には、商用周波による交流電化を行うべきである。

直流電化と商用周波交流による電化との経済性を比較してみると、以下述べるように交流電化のほうが有利となる。すなわち、商用周波交流および直流 1,500 V 式による電気牽引効率を比べてみるとそれぞれ 76~81% および 73~76% であって交流の方が有利であり、また火力発電の熱効率を 26%、送電効率を 98% とすれば、火力電気による鉄道の列車牽引熱効率は商用周波交流式が 19.5~20.5%、直流 1,500 V 式が 18.5~19.5% であって、熱エネルギーの有効利用度においても商用周波電化は有利である。(蒸気機関車の熱効率は 4~5%、ディーゼル電気機関車では 23~28% 程度である)

交流電化が直流方式に比べて有利である最大の理由

は、地上施設に対する投資が交流の場合、送電線、変電所合わせて直流のわずか 20~30% で済み、架空電車線も直流の 60~80% で済むということにある。結局、地上施設費全体として直流式の 60~70% で済む。機関車の新製費を直流の 80~90% とすれば、商用周波交流電化の全電化費は、直流 1,500 V 電化に比べて 65~75% で済むことになる。

交流電化した場合使用される交流電気機関車もすでに三菱電機において世界水準を抜く優秀な性能を持つものが多数製作されて、営業運転に偉力を発揮しており、また、交流を直流に変換することなくトルクコンバータとインダクションモータとを組み合わせて、インダクションモータで直接駆動する、完全な交流電気車も目下開発中である。

トルクコンバータ・インダクションモータ形電気車が完成すれば、車両製作費も直流式に比し問題とならないほど低廉となり、交流電化方式の有利性は決定的となるであろう。

台湾においては最近重工業が急速に発展し、鉄道輸送も非常に幅狭しているため、台中付近に新しく港を開き、海上輸送の増加を計らなければならない状態であるということであるが、かかる状況なればこそ、1 日も早く鉄道を電化し、熱効率の回収と輸送量の増大を計るべきであろう。



図 9.1 北陸線で活躍している ED-70 形イグナイトロン式交流電気機関車

Fig. 9.1 Type ED-70 ignitron AC locomotive operating in Hokuriku line.

10. 家庭電化と農村電化

台湾電力における現在の発電容量を見ると、水力発電設備容量が約 445 MW、火力発電設備容量が約 178 MW 計約 633 MW でありこれに対して負荷容量は約 558 MW でそのほとんどが重工業負荷となっている。

このように台湾では現在電力はほとんど重工業負荷に供給されていて、一般用の電力はきわめて少なく電力はかなり不足しているという状況である。重工業負荷への

電力の供給を確保するため、台湾では政令によって一般家庭における電力使用は制限を受けており、家庭電化はあまり普及していない。

電力使用制限のおもな対象は電熱器関係であって、モータを使用する製品では比較的制限はゆるい。

すなわち、電気七輪(図 10.1)、電気釜(図 10.2)、トースタ(図 10.3)などの使用制限はきびしく、たとえば電熱器または電気釜を使用してご飯をたくことは政令によって固く禁じられており、発見された場合には、かなりの厳罰に処せられるという話である。一方モータを使用した商品である扇風機(図 10.4)、電気洗濯機(図 10.5)、電気冷蔵庫(図 10.6)などは使用してもさしつかえないことになっているが、これらは高級品であるために一般家庭に普及するに至っていないので、結局家庭電化はあまり行われていないという実情である。

家庭用の電力料金はわが国に比べると非常に安く、わ

が国では 1 kWh あたり約 10 円であるのに対して、台湾では 1 kWh あたり 3 円 50 銭くらいであるから、電力使用制限が緩和されれば、家庭電化はかなり有望である。

一方農村電化はさかんに行われており、農業用モータ(図 10.7)、灌漑給水用井戸ポンプ(図 10.8)などかなり使用されている。

これまで台湾には家庭用電気品の優秀なメーカーがなく、扇風機をはじめ大部分がわが国から輸入したものであったが、最近あるメーカーはウエスチングハウス社と技術提携を結び、扇風機、電気洗濯機の生産を開始して、技術的にかなり優秀な製品を市場に送り始めたといわれる。

このメーカーは冷凍機をはじめ、次第に製品の種類も豊富にし、技術レベルも一段と向上するであろうといわれている。こうして台湾では家庭用電気品を台湾内で自給することが計画されている。



図 10.1 三菱 H-12 形電気七輪
Fig. 10.1 Type H-12 Mitsubishi electric stove



図 10.2 NA-71 形 7 合炊電気釜
Fig. 10.2 Type NA-71 Mitsubishi rice cooker



図 10.3 三菱 MT-11 形トースタ
Fig. 10.3 Type MT Mitsubishi toaster



図 10.4 三菱 12" 細目標準扇風機
Fig. 10.4 Mitsubishi 12 in small slit standard fan.



図 10.5 三菱 EW-301 形噴流式洗濯機
Fig. 10.5 Type EV-301 Mitsubishi washer pulsator type



図 10.6 三菱 MR-1100 形冷蔵庫
Fig. 10.6 Type MR-1100 Mitsubishi refrigerator.



図 10.7 三菱 SB-A 形スーパーライン A モートル
Fig. 10.7 Type SB-A Mitsubishi superline A motor



図 10.8 三菱 WP-150 形 100 W 50 c/s 井戸ポンプ
160 形 100 W 60 c/s
Fig. 10.8 Type WP-150 100 W 50 cycle or 160 100 W 60 cycle well pump.

11. その他の話題

11.1 原子力発電

原子力発電に関しては、近年世を上げて話題の中心となり、水力および火力に次いで第三の電力源としてその建設ならびに運営などについて真剣に論じられている。

台湾電力においても火力関係の人が中心となって、委員会が設けられ、原子力発電に関して研究が行われている模様である。台湾における電力の現況は表 12.2 に示されているとおりであり、今後 10 年間くらいは水主火従の状態が続くものと思われるが、負荷の急激な増加、石炭の埋蔵量および水力発電地点の開発状況などから考え合わせて、原子力発電の採用が必然的に浮び上がってくる。

発電所の第一号機としては、日本よりも一足先に、PWR 形、1 万 kW の原子力発電所が米国のウエスチングハウス社に発注されたとのことであるが、その設置場所その他に関してはまだ確定していないとのことである。なお台湾電力における将来の発電所建設計画の中には、10 年後に 10 万 kW、20 年後に 45 万 kW、25 年後に 85 万 kW の原子力発電が組み込まれている。

11.2 直流送電

直流送電の研究は古くから行われてきたが、実用としては、1944 年にドイツにおいてベルリン—エルベ間に 40 kV、6 万 kW が完成し、また 1954 年にスウェーデンにおいてゴットランド島との間に 2 万 kW の直流送電が運転を開始した。その他英仏海峡の高圧海底ケーブルによる直流送電およびソ連における長距離大電力直流送電などの計画も具体化しつつある。わが国においても三菱電機において長年研究が行われていたが、去る 3 月 18 日 16 時 26 分、長崎港外にある三菱鉱業所高島と九州本土対岸の岳路とを結ぶ海底 5 km の直流送電に成功し、小規模ながらわが国最初の直流送電として、実用化への一歩を踏み出した。直流送電はその特性上、ケーブルを利用する離島への送電がもっとも有利であるのはもちろんであって、わが国においても屋久島、佐渡島が今後の対象となっているようである。このような条件に照して、台湾における直流送電を考える場合に、地理的にすぐ思い出されるのは、台湾本島の西方約 100 km、東支那海にある澎湖島である。もし本島から送電を行うとすれば、直流送電以外には考えられないが、現状としては、澎湖島の負荷は以外に少なく、また島全体が珊瑚礁であり、平坦であって屋久島のように発電地点もなく、また鉱工業が将来それほど発展して負荷が増加するとも思われないので、直流送電の実現は今のところ見込はないようである。

12. む す び

台湾電力における技術的の諸問題として、われわれは以上述べた事項のほかにも数多くの問題について懇談した。これらについて述べると、送電線の経済評価、Radio-Noise および Televi-Noise、Counter Poise、接地方式、

表 12.1 負荷 (先頭) kW

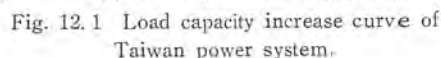
	1957	1962	1967	1972	1977	1982
PA-TU	65,100	104,700	149,200	210,400	306,000	423,000
TAI-PEI	103,100	165,700	237,400	344,700	488,000	680,000
SUNG SHU-CHIAO	16,500	26,600	38,400	54,500	76,000	107,000
HSIH-CHU	39,000	62,800	89,600	126,300	158,000	210,000
SHIH-KANG	28,500	45,900	64,900	91,600	149,000	241,000
WU-FUNG	19,000	30,600	43,200	61,600	85,000	131,000
CHIA-YI	20,500	33,000	46,600	65,800	92,000	140,000
HSIN-YING	20,500	33,000	46,600	65,800	92,000	130,000
SAN-SHANG	21,000	33,800	48,700	68,800	96,000	135,000
KAO-HSIUNG	127,100	204,500	292,000	422,500	602,000	840,000
TUNG-PU	37,500	60,400	85,700	109,000	115,000	135,000
SUN-MOON LAKE LOCALFEEDER	2,700	4,000	5,700	8,500	11,000	15,300
TOTAL	500,500	805,000	1,148,000	1,620,000	2,270,000	3,190,000

表 12.2 水力、火力発電計画

		1957	1962	1967	1972	1977	1982
EXISTING HYDRO	RUN OF RIVER	153,770	202,370	202,370	202,370	202,370	202,370
	SHIH-MEN		80,000	80,000	80,000	80,000	80,000
	SUN MOON LAKE & WU-SHEH	173,500	173,500	173,500	173,500	173,500	173,500
	TOTAL	327,270	455,870	455,870	455,870	455,870	455,870
TA-CHIA RIVER	TA-CHIEH		140,000	140,000	140,000	280,000	420,000
	CHIN-SHAN			160,000	160,000	320,000	480,000
	KU-KUAN		90,000	90,000	90,000	180,000	180,000
	TOTAL		230,000	390,000	390,000	780,000	1,080,000
	TIEN-LUN	79,500	79,500	79,500	79,500	79,500	79,500
	MA-AN			55,000	55,000	55,000	55,000
	SHIH-KANG			81,500	81,500	81,500	81,500
	TOTAL	79,500	79,500	216,000	216,000	216,000	216,000
NEW HYDRO	TOTAL				300,000	360,000	360,000
	TOTAL				130,000	130,000	130,000
HYDRO TOTAL		406,770	765,370	1,061,870	1,491,870	1,941,870	2,241,870
THERMAL TOTAL		138,500	378,500	470,000	470,000	920,000	1,770,000
OVERALL TOTAL		545,270	1,143,870	1,531,870	1,961,870	2,861,870	4,011,870

OCB の遮断容量、CT の大電流特性、直列コンデンサ、絶縁劣化判定法、変圧器窒素封入装置、ACB の事故、AFC、電気ガバナ、テレメータとテレコントロール、リアクティブのコントロール、冷却水の価値評価、水車の Cavitation、バッキング、発電機 Field Coil の Layer Short 事故、Unit Substation、配電用工具、Joint、盗

終りに、台湾電力がますます健全なる発展をされんことを祈るとともに、諸氏のご帰国後ますますご活躍になることを期待する次第である。



(1) CIGRE 1958. Paper 407.

(1061) 51

直 流 送 電

本 社 木 村 久 男*

DC Power Transmission

Head Office Hisao KIMURA

A-c power transmission has made a striking progress now-a-days. Nevertheless, such problems as stability and corona losses due to rise in voltage often confront the engineers in the case of large power projects with increase of transmission voltage and distance. As one of technical and economical solutions of the problems, study on d-c power transmission has been carried on for long in the circles. Excellent operating results, accomplished in 1954 at Gotland in Sweden, of 20,000 kW d-c power transmission stand out among others as a notable landmark in the development. Similar ideas prevail in this country, too, the project of Takashima high voltage d-c power transmission being the first success in Japan.

1. ま え が き

現在交流送電は非常な発達をとげているが、なお長距離、大電力の送電に対しては、安定度の問題、昇圧によるコロナ損の問題などが電圧と距離が増大することによって生じてくる。これらの技術的、あるいは経済的な問題の一つの解決方法として、直流送電の研究は古くから行われてきたが、1954年に完成したスウェーデンゴットランドの2万kW直流送電のすぐれた運転実績によって実用期にはいり、英仏海峡の高圧海底ケーブルによる直流送電、あるいはソ連における長距離大電力直流送電などの計画も具体化されつつある。

わが国においても直流送電の研究は活発に行われており、電気協同研究会の直流送電専門委員会中間報告を始め多くの報告文献があるが、ここでは直流送電についてきわめて概説的にその歴史、経済性、特長を解説し、あわせてこのたび本邦において最初に成功した高島高圧直流送電の概要について述べる。

2. 直流送電発展の経過

直流送電の発達の跡をたどってみると、その歴史はきわめて古く、直流変換装置としても、直流発電機を縦続接続としたもの、熱陰極放電管を利用したもの、あるいは Marx 氏の高気圧弧光変換器などが用いられたこともあるが、実際的には現在利用されている高圧水銀整流器の発達がめざましく、これによって直流送電が完成されている。

そのおもなものを拾ってみると、1939年すなわち今から18年前にスイスの万国博覧会に B.B.C. によって 50 kV の直流送電装置が展示されている。これは 500 kW の小容量のものであるが、とにかく Zulich-Wetington 間 20 km を 50 kV で送電し、はじめて直流送電の可能性を示したものである。

このころよりドイツでは S.S.W および A.E.G. によって研究が行われ、1944年には Berlin-Elbe 間に 40 kV 6 万 kW の直流送電が完成された。(図 2.1 参照)

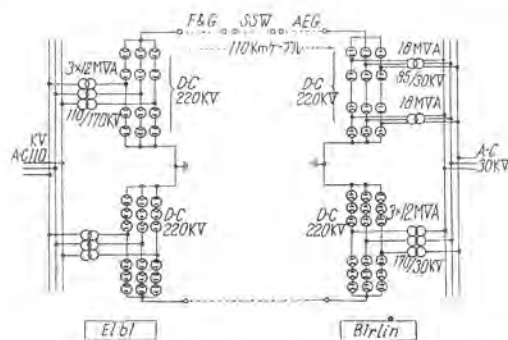


図 2.1 エルベ—ベルリン間の DC 送電計画

Fig. 2.1 DC power transmission between Elbe and Berlin.

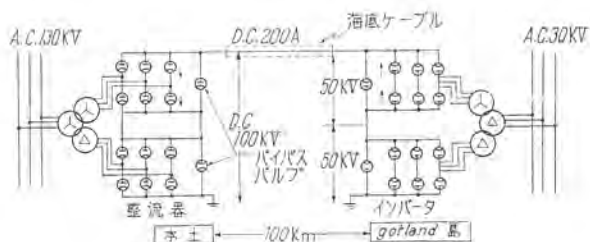


図 2.2 ゴットランド直流送電装置

Fig. 2.2 DC power transmission line.

これは 110 km の地下ケーブル 2 本で送電された、この装置は完成後旬日にして終戦となりソ連に持ち去られている。

一方スウェーデンにおいても活発な研究が行われ、電力局とメーカの A.S.E.R が協力し、大規模な試験所を作り研究がつづけられてきたが、1954年に本土—Gotland 島間の直流送電を完成した。これは図 2.2 に示すように 100 kV、2 万 kW を 100 km の単心 1 条の海底ケーブルで送電するもので、本土の低廉な水力電気を島におくるもので、現在まで良好な運転成績を示している。これはなお将来 200 kV、4 万 kW に増設される予定となっている。

英仏においても研究が行われているが、最近英仏海峡を直流ケーブルでつなぎ、直流送電によって両国の電力網を接続し、電力の融通を行うべき具体的な計画がすす

められている。

ソ連においては長距離送電の必要性からモスコ—カシラ間に 200 kV, 30 kW の試験送電設備をつくり実際の研究を行っており、近い将来、シベリヤ方面の水力をウラル方面に送るため 50~60 万 kW, 360 マイルの大直流送電を計画していることを発表している。

その他ヨーロッパでは、ノールウェーの豊富な水力をデンマークに送電するため、あるいはオーストリア、ユーゴスラビア、イタリア間など、大電力、長距離送電に直流送電を利用することが検討されている。

一方わが国においても、昭和 24 年ごろから研究が行われており、その具体的対象として屋久島の包蔵水力の送電が取り上げられ、電気協同研究会において直流送電専門委員会がもたれ、各種の技術的、経済的問題が検討され、各メーカは高压水銀整流器の研究試作を行っているが、当社では長年研究研鑽の結果、本年 3 月 18 日三菱鉱業高島と九州本土岳路との間に、日本における最初の直流送電に成功した。

3. 直流送電の特長

直流送電が交流送電に比して有している特長について、主として経済的に有利な点を簡単に列記してみるとつぎのように考えられる。

(1) 架空送電線の場合、同じがいし、電線を使用すると、コロナおよび絶縁耐力の点で、直流では、交流電圧の波高値まで上げうるので、三相三線式交流と二線式直流を考えると同一銅量の電線で約 4 割増の送電が可能となる。すなわち、

$$\text{直流電力 } P_d = 2E_d I_d$$

$$(E_d: \text{直流対地電圧 } I_d: \text{直流電流})$$

$$\text{交流電力 } P_a = 3E_a I_a$$

$$(E_a: \text{交流対地電圧 } I_a: \text{交流電流})$$

$$I_d = I_a, E_d = \sqrt{2} E_a \text{ とすれば,}$$

$$\frac{P_d}{P_a} = \frac{2E_d I_d}{3E_a I_a} = \frac{2\sqrt{2} E_a I_a}{3E_a I_a} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \approx 0.947$$

となり、交流の力率を 1 としても同じ太さの電線 3 本を使用した交流電力の 95% 程度を 2 本で送電しうる。したがって電線 1 本あたりの送電電力は 1.41 倍となり、逆に同一電力を送電する場合は、約 7 割の銅量でよいことになる。

また以上から損失は同一電力の送電に対して 2/3 ということになり、さらに交流の場合の力率、表皮作用のことを考えると、それだけ直流送電が有利となる。

また線路リアクタンスが大となると交流では安定度の問題で電線の電流容量に達しないうちに送電電力限界がきまるが、直流送電の場合は問題とならない。

(2) ケーブルを利用する場合(海洋、湖沼、砂漠などの横断)はケーブル費はきわめて安価にできる。これは油浸紙に対する電圧のかかり方が直流、交流で異なり、かつ、直流の場合は誘電体損もなく、電離作用による絶縁劣化がないので直流ケーブルの絶縁はきわめて簡単

で有利にできるためである。たとえば直流対地 10 万 V のケーブルは交流 2 万 V 程度の絶縁でよくゴットランドの 10 万 V, 直流ケーブルは絶縁厚さ 7 mm, 高島直流送電の場合は 6 万 V 用で 4 mm となっている。

また、ケーブル送電の場合、交流では、対地および線間容量のため充電電流がきわめて大となり、このため交流では長距離送電はまず不可能と考えられるが、直流ではこの点問題はなく有利である。

(3) 直流送電ではいったん直流にするため、異周波数電力系統間の連繋が可能となり、換言すれば周波数変換も送電と同時に行うことができ、かつこのように両系統の周波数に無関係な電力授受を行いうるため、各系統の潮流制御は、交流連繋の場合のように連繋点の測定電力を発電所まで伝送して制御するような複雑な方式をとる必要がなく、直流送電自身をその点で自由に調整することができ、かつ、非常に応動速度の早い制御が可能であり、発電所群の潮流をグループコントロールすることも簡単にできる。

(4) 直流送電は端末の変換装置の設備費が高価となるが、これは小単位のを組み合わせてあるため、変換装置は需要に応じて増設することも可能で、比較的費用のやすい線路部分だけを将来の増強を見こした電圧とし 1 条(帰路は大地または ground wire)あるいは 2 条建設するなど資本の分割投資が可能である。

4. 直流送電の経済性

直流送電では端末変電所に直流変換装置を必要とするが、一方送電線路は交流に比して簡単で廉価である。したがって両者の経済的な優劣は送電距離によって決定される。この限界距離は考慮すべき要素が複雑なため 400~1,000 km と種々の値が出ている。古いデータであるが、BBC の Ch. Ehrensperger 氏 (1945, B. B. Rev) は 30~80 万 kW の送電線について損失を 1%/100 km として、(イ) AC 2 回線 (15~40 kV), (ロ) DC 2 回線 (300~600 kV), (ハ) DC 1 回線 (300~600 kV) の送電電力に対する経費を出しているが、これによると図 4.1 に示すように戦前価格で、(ロ) は (イ) の 70% 以下、(ハ) は (イ) の半分以下となっている。その理由として導体数が少なく支柱が簡単、高压で使用できる、表皮効果が少なく、中空導体の使用があまり必要でないことなどをあげている。さらに 40 万 kW 程度の全設備に対する kWh あたりの価格を示し、(ロ) の場合は 400 km, (ハ) の場合は 200 km という限界距離を出している。

また図 4.1 (B) に示すように直流送電の場合はケーブルも架空線と同程度の価格で建設できるということは注目すべきことであるとしている。

一方わが国の直流送電専門委員会では昭和 30 年に検討された結果では図 4.2, 4.3 のようになっている。この比較の前提条件としてはつぎのとおりである。

(1) 直流送電は架空線送電の場合 3 導体 (1 導体は架空地線で、1 線断線の場合、大地電位導体として使用

し、1/2 容量の送電を確保する), ケーブル送電の場合は 2 導体 1 回線とする。交流架空線は直流の場合と合わせるため 2 回線とする。

(2) 交流送電の場合も一般的な場合として, 両端に変電所のある場合を考える。

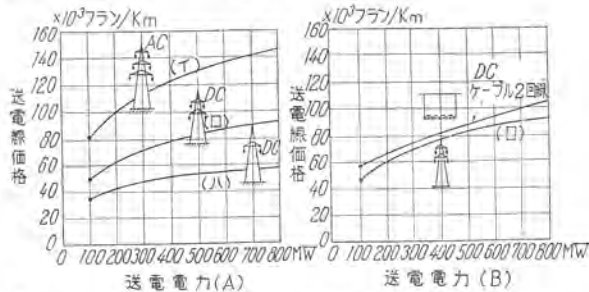


図 4.1 三相交流と直流送電の線路の価格 (loss 1%/100 km)
Fig. 4.1 Comparison of price between 3 phase a-c and DC power transmission.

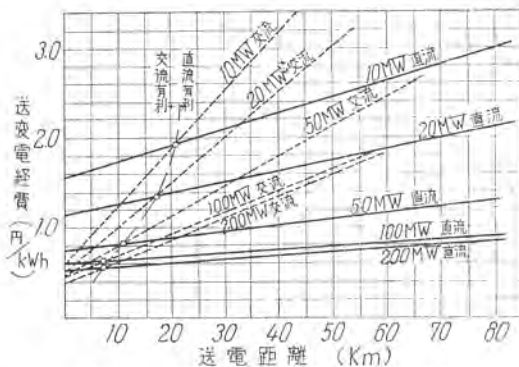


図 4.2 海底ケーブル送電の送変電経費
Fig. 4.2 Transmission expense of submarine cable.

表 4.1

	送電電力 (MW)	年間電力量 (10 ⁶ kWh)	送電電圧 (kV)	送 電 線 (1km あたり)					変 電 所		
				電線数	ケーブル導体太さ (mm ²)	建設費 (10 ⁶ 円)	年経費 (10 ⁶ 円)	損失経費 (10 ⁶ 円)	建設費 (10 ⁶ 円)	年経費 (10 ⁶ 円)	損失経費 (10 ⁶ 円)
交 流 送 電	10	52	20	2 回線	50	20	3.0	0.4	200	26	4.7
	20	104	20	"	100	28	4.2	1.1	350	46	9
	50	260	30	"	200	51	7.2	1.5	750	98	23
	100	521	30	"	400	64	9.6	3.0	1,370	178	47
	200	1,042	30	4 回線	400	128	19.2	6.0	2,500	325	93
直 流 送 電	10	52	100	単心 2 本	50	5.6	0.84	0.10	500	75	6
	20	104	100	"	100	7.2	1.08	0.18	720	108	13
	50	260	200	"	100	9.8	1.46	0.28	1,100	165	31
	100	521	200	"	200	12.0	1.80	0.54	1,700	255	63
	200	1,042	300	"	400	24.0	3.60	0.48	3,200	480	126

表 4.2

	送電電力 (MW)	年間電力量 (10 ⁶ kWh)	送電電圧 (kV)	がいし個数	送 電 線 (1km あたり)					変 電 所		
					電線数	電線太さ (mm ²)	建設費 (10 ⁶ 円)	年経費 (10 ⁶ 円)	損失経費 (10 ⁶ 円)	建設費 (10 ⁶ 円)	年経費 (10 ⁶ 円)	損失経費 (10 ⁶ 円)
交 流 送 電	50	260	100	7	2 回線	160 ACSR	16	2.10	0.46	800	104	23
	100	521	140	9	"	240 "	18	2.35	0.64	1,500	195	47
	200	1,042	220	14	"	330 "	28	3.64	0.62	2,800	365	93
	400	2,084	270	16	"	610 "	40	5.20	1.28	5,600	730	186
直 流 送 電	50	260	200	9	3 本 1 回線	240 ACSR	10	1.30	0.30	1,100	165	31
	100	521	300	13	"	330 "	14	1.82	0.40	1,700	255	63
	200	1,042	300	13	"	430 "	18	2.34	0.70	3,200	480	126
	400	2,084	400	18	"	610 "	22	2.86	1.96	6,200	930	252

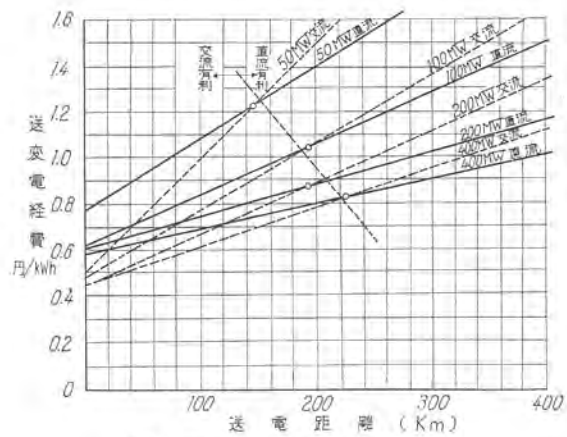


図 4.3 架空線送電の送変電経費
Fig. 4.3 Transmission expense of overhead line.

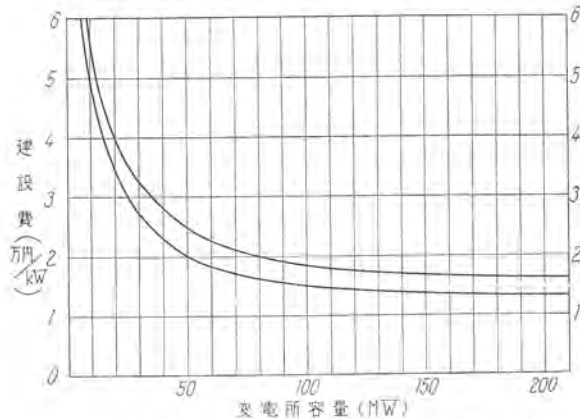


図 4.4 直流送電用変電所建設費 (送受両端合計)
Fig. 4.4 Building cost of substation for DC power transmission.

(3) 直流送電の両端局変電所の建設費は各メーカーからの資料による図 4.4 の平均をとった。交流変電所および交直流送電線路の建設費は表 4.1, 4.2 に示す値とする。

(4) 建設費に対する年経費の割合は, 架空線および交流変電所では 13%, 海底ケーブルおよび直流変電所に対しては安全性をみて 15%とする。

(5) 電力損失の価値計算は送電端原価を 3 円/kWh と考え, 変電所損失は送受両端合計の年損失率を交流の場合 3%, 直流の場合 4%とする。

(6) 送電の年負荷率を 60%, 年損失係数を 40%とする。

(7) 交流の海底ケーブル送電はさらに高い電圧も考えられるが, 現在の 30 kV 以下を考える。

この結果では海底送電では 20km 以上の送電距離で一般に直流が有利となり, 送電容量が大きいときは 10 km でも直流が有利となり, 架空送電の場合は 200 km 程度以上では直流のほうが有利とな

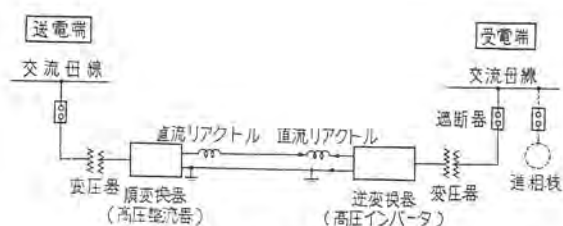


図 5.1 直流送電の構成

Fig. 5.1 Construction of DC power transmission.

るが、100～300 km における両者の差はわずかであるという結果になっている。

以上はきわめて一般的な場合で、実際にはその場合場合にに応じて具体的に検討する必要があると考えられる。

5. 直流送電装置の概要と動作特性

5.1 直流送電装置の構成

直流送電を行うには、送電端に交流を高圧直流に変換する順変換装置、受電端にこの高圧直流を再び交流にもどす逆変換装置が必要である。図 5.1 に示すように順逆変換装置は交流遮断器、整流器用変圧器、高圧水銀整流器、同制御装置、直流リアクトルおよびその他付属装置から成っている。ほかに逆変換器（インバータ）の運転には一定の無効電力を必要とし、受電端の交流側で十分な無効電力が得られない場合は新たに進相機、コンデンサを設ける必要がある。

主変圧器は後述のように三相全波回路に使用される場合は一般電力用の変圧器と同様で三相または大電力の場合は单相 3 台となる。二次電圧は直流送電電圧できまり順逆変換装置のいずれかに負荷時タップ切替器を付す場合が多い。

直流リアクトルは直流線路に流れるリップルを抑える平滑作用と故障時の限流作用をするもので一般に相当大きなものとなる。

5.2 順逆変換装置の接続

主変圧器と整流器、インバータの接続はいずれも三相全波回路、すなわち、グレート結線になっている。

一般の電鉄用、あるいは電気化学用電源としての水銀整流器は図 5.2 のように二重星形の結線が用いられるが、直流送電には普通のグレート結線が用いられる。

これはグレート結線の場合は二重星形結線の場合に比べて、変圧器容量が約 20%ほど小さくなることと、相間リアクトルが不要で、一般の電力用変圧器と同一構造になしうることなどのほかに同一直流電圧を得る場合、整流器にかかる逆電圧を約半分にするという高圧整流器にとって非常に有利な点があるためである。もっともグレート結線では各相の整流器の陰極は共通にできないため単陽極形整流器にする必要がある。

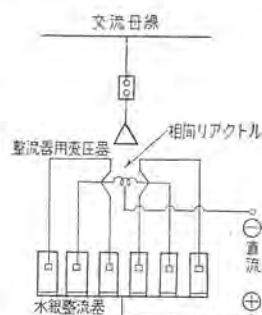


図 5.2 二重星形結線

Fig. 5.2 Double star connection.

また、一般に高圧の直流を得るために直列接続を採用している。これはたとえば図 2.1 のベルリン-エルベ間の直流送電の接続のように対地 20 万 V を得るため、いくつかの整流器を直列につなぐ方式(左上)と、整流器路全体を直列につなぐ方式(右上)がある。

この二つの方式については現在なお優劣が論じられているところである。

元来電子管としての水銀整流器にはある程度の逆弧（これは整流器の整流作用の喪失で相间短路を意味する）が伴い、整流器の技術が進んだ今日でもなお絶対に逆弧しないとは断言し得ない。したがって高度の信頼度を必要とする直流送電に対して、この対策が一つの重要な課題となる。

この見地から見て、バルブ(整流器)を直列にする方式は、たとえば 20 万 V の電圧を得るために 10 万 V 耐圧のバルブ 3 個を直列とする。あるいは 20 万 V 耐圧のもの 2 個を直列にしておき、仮に 1 個が逆弧しても残ったバルブでもちこたえ短絡電流を阻止して、運転をつづけるというアイディアである。逆弧の発生は確率的に発生するから 2 個以上の直列バルブが同時に逆弧する確率は非常に小となる。Westinghouse の Slepian 氏、B. B. C の H. Keller 氏が、この実験を行っており、後者の計算では 2 時間に 1 回の割で逆弧するバルブを 2 個直列につないで使用すれば逆弧確率は 4 年に 1 回の割になることを示している。

整流装置全体を直列とする方式は図 2.2 のゴットランドの直流送電にも採用されている。

すなわち、5 万 V のセット 2 台を直列として 10 万 V 2 万 kW を送電するもので、これにはバイパスバルブが使用されている。たとえばいずれかのグループのバルブが 1 個逆弧するとこのバイパスバルブをただちに点弧させ、このグループを短絡させる。したがって電圧は健全グループの 5 万 V に下がるが、送電電流は正常に流れつづける 1/2 の電力送電をつづける。この間に逆弧したバルブは短絡のため、自然に消弧するからバイパスバルブを消弧して短絡を解けば正常運転にもどる。この動作は 0.5 秒程度で自動的に行われるから逆弧を発生しても実用上さしつかえないことになる。この保護方式はインバータの転流失敗に対しても採られ同様の効果を発揮する。

なおグループ直列方式では各グループの位相を変圧器巻線によって 30 度、あるいは 15 度ずつずらし、交流側からみた相数を 12 相、あるいは 24 相などになしうるため、交流側誘導障害軽減に効果がある。

また、電流を増大する方法としては標準のバルブを 2 個あるいは 3 個まで並列にすることも容易でゴットランドでは 2 陽極を並列としている。

5.3 高圧整流器およびインバータ

直流送電装置の根幹をなすものは順、逆変換器であるが、これらの高圧整流器およびインバータは構造的にまったく同一である。前述のように、直列接続が用いられ

るため現在までに製作されているのは単器 5 万 V あるいは 10 万 V が普通で、電流量としては 6 本を三相全波として 150~200 A 程度で、これ以上は並列接続が用いられるべきと考える。

構造的に普通の水銀整流器と異なる点は陽極陰極間に中間陽極が数個あるいは十数個介入されている点で、これによって陽極陰極間にかかる高い逆電圧、順電圧を適当に小さく分割して高耐圧の特性をもたしている。この中間陽極に適当な電位を与えるのにコンデンサブッシングにおけるように内部静電容量を利用して自動的に行う場合と、外部に口出しして適当な電圧分割装置を用いる方式とがある。その他、一般用に比して使用材料をとくに厳選し処理、組立にもとくに注意を要することはもちろんで、高圧用として生じやすい内部の汚染防止、消イオン、水銀蒸気圧の制御などについては細かい設計上の注意が払われなければならない。

なお現在の一般用水銀整流器はほとんど真空排気装置を有しない密封形となっているが、高圧用はまだいずれもポンプを有しており、これは保守上の便宜を考えると当然密封形となすべきで、当社でも 2 万 V 用のものはすでに試作が完了している。冷却方式としては、風冷あるいは液冷が使用されており、風冷式は簡便であるが、わが国のように夏季高気温となるところでは温度制御が相当困難となるきらいがある。

5.4 整流器およびインバータの一般的特性

水銀整流器はその介作用によって陽極から陰極方向にだけ電流を流しうるものであるが、その各サイクルにおける通流位相を制御格子によって、自由に制御し、出力電圧を制御することができる。すなわち、陽極の通流は、

陽極が陰極に対して正電位にあり、常時負バイアスのかかっている制御格子に正電位を与えることにより行われる。かつ、いったん通流した後は陽極が負電位にならなければこの通流を停止することはできない。すなわち、格子を負電位とするだけでは消弧できない。図 5.3 について簡単に三相の半波整流の場合について、この位相制御を説明してみると、(ア) 図は位相制御を行わない整流器の場合で、(エ) 図に示すように各陽極の電圧をそれぞれ e_1, e_2, e_3 とすると、(ア) 図のように陽極 1 の電流は e_1 と e_2 の電圧の正側交点 t_0 より e_1, e_2 の交点 t_1 まで流れる。 t_1 で陽極 2 の電圧は 1 より高電位となるため、陽極 1 の電流は消滅し、陽極 2 が点弧し、 t_2 まで電流を流す。同様に陽極 3 の電流は t_2 より t_3 まで流れる。したがって直流電圧（電弧電圧を無視した無負荷直流電圧）は、これらの通流期間中の各相電圧を包絡する太線で示す波形となる。(イ) 図は位相制御を行った場合の t_0 では格子に負バイアスが加えられているため、陽極は t_0' で点弧する。すなわち、格子に印加する正の先頭波電圧の位相を t_0 より t_0' に遅らすことによって、陽極の点弧を α 角だけ遅らせることができる。直流電圧は同じく太線で示すようになり無負荷時平均直流電圧は $E_{d0} \cos \alpha$ となる。ここに α は位相制御角（遅れ角）、 E_{d0} は位相制御を行わない場合の無負荷時平均電圧である。したがって点弧位相をさらに遅らせ $\alpha=90$ 度とすると $E_{d0} \cos \alpha$ は零となる。（ただし負荷は抵抗に比べて、インダクタンスが非常に大であると仮定する）。さらに位相を遅らせ $90^\circ < \alpha < 180$ 度とすると、 $E_{d0} \cos \alpha$ は負となる。この場合、 t_0' より t_1' までの相電圧の平均値は負となるため、格子を正としても陽極電流は流れない。このとき(オ) に示すように直流側から、この負の相電圧のうち勝つ電圧を加えると電流を流すことができる。この場合変圧器の二次巻線に流れる電流の方向は前と同じであるが、通流する位相が異なっている。したがって図 5.4 (ア) と (イ) に示すように電力の符号は正負逆になり、(ア) の整流器の場合と、(イ) の場合では変圧器は反対の仕事をしたこととなる。つまり、この図 5.4 (イ)、すなわち、図 5.3 (ウ) の場合がインバータで、直流側の電力は変圧器を経て交流側に押し込まれることになる。図 5.3 (ウ) に示すようにインバータの場合の位相角は遅れ角 α であらわせずに相電圧の負側の交点 t_0' からだけ進み角 γ であらわされる、ただし $\gamma=180$ 度 $-\alpha$ である。また太線で示す包絡線はインバータの場合は直流電動機における逆起電力にあたるもので、直流側から加えられる電圧はこれより大きくなければならない。

インバータで直流を交流に変換するためにはもちろんその交流系の相回転にあわせて陽極に順次電流を流す必要があり、図 5.3 (ウ) に示すように陽極 3 から 1 に転流させるためには格子を正電位にしたとき陽極 1 の電位は 3 よりも高くなければならない。したがってインバータの陽極を順次転流させるためには変換する交流電圧を陽極にあたえるとともに、格子を t_0' よりも進んだ位相

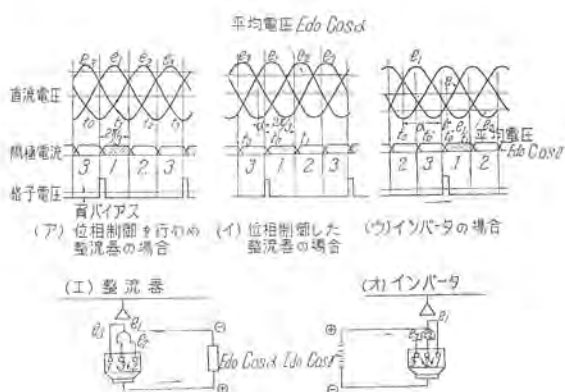


図 5.3 動作説明図

Fig. 5.3 Description on operation.

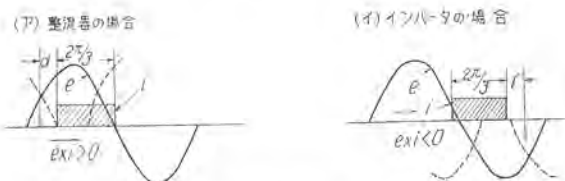


図 5.4 変圧器二次電圧と電流

Fig. 5.4 Transformer secondary voltage and current.

で開放することが必要である。この位相で転流を行わないと、 t_0' 以後の位相では e_3 は e_1 より高電位となり、もはや陽極 3 から 1 への転流は行われず、3 は電流を流しつつ、逆起電力となっていた負の相電圧は α 点で正となり、陽極 3 には大きな短絡電流が流れる。一般に二つの陽極間の転流には陽極回路のリアクタンス（転流リアクタンス）によって、一定の時間（重なり角）を要し、また陽極付近のイオンが拡散消滅するまでは通流を終った陽極を格子によって制御することができないため、電弧の消えた陽極はイオンがある程度消滅するまでは再点弧の危険がある。したがって一般にインバータを安全に運転するためにはこれらの点を考えて陽極の点弧位相を位相制御角 $\gamma > (\text{重なり角 } \mu) + (\text{消イオン時間 } \tau)$ の条件が満足される位相で行うことが必要である。

5.5 直流送電の動作特性

直流送電の特性は前述の整流器およびインバータの特性から容易に得られるが、これらを列記してみると次のようになる。

(1) 直流送電電力は整流器の直流出力電圧およびインバータの直流逆起電力だけによって定まる。したがって整流器およびインバータに加えられる交流電圧の大きさ、および両器の位相制御角 α 角、 γ 角の四つの要素のいずれでも電力を制御しうる。とくに位相制御角によるときはきわめて小さい制御電力で時間遅れなく容易に制御しうる。また遠方制御も容易に行いうる。

(2) 交流側の電圧が変動すれば、もちろん送電電力が変動するが、これは位相制御によって簡単に補償することができ、一定電力送電、プログラム制御など任意の制御をなしうる。

(3) 交流側の力率は図 5.4 のように整流器側、インバータ側それぞれ、一義的にその位相制御角の余弦にほぼ比例して定まる。ただ直流が介在しているため送電端からインバータ側に無効電力を送ることはできないから、インバータ側は独自でその所要無効電力を補償する進相装置を必要とする。

(4) 直流が介在しているため送受電端間の周波数は異なってもよく、可撓的な連繋ができる。インバータ側交流出力の周波数は、その主変圧器を励磁する交流周波数で定まり、その交流母線につながる交流機の周波数そのものである。

換言すれば受電端の交流にはインバータ用変圧器を励磁し、かつ無効電力を補償すべき交流発電機、または同期進相機を必要とする。もっとも無効電力の一部は静電蓄電器で補償しうる。(回転機の代りに静電蓄電器だけを使用した自動方式のインバータもあるが、直流送電の方式としては不安定となりやすい。)

(5) 整流器はその位相制御角を 180° 近く遅らせることによってインバータとなしうるから、両器の位相制御機構を変えることによって容易に可逆送電をなしうる。

(6) 受電端側の故障の場合は整流器すなわち送電端

交流系から故障電流が流れるが、これは格子遮断によって 1 c/s 以内に遮断しうる。

逆に送電端側の故障に対してはインバータ側交流系から故障電流は逆流しない。

(7) 逆弧、転流失敗などの偶発的パルプの故障に対しては 1 c/s 以内の遮断、数 c/s 内の再閉路を行うため実用上ほとんど問題とならない。

(8) 直流送電変換装置の損失としてはバルブ内のアーカ電圧降下による損失と制御電力であるが、これらは非常に小さく、普通ほとんど主変圧器の損失だけで能率が決定される。

6. 高島高圧直流送電の概要

6.1 計画の概要

この送電は図 6.1 に示すように九州本土岳路変電所において $60 \text{ kV } 60 \text{ c/s}$ の交流電力を高圧水銀変換装置で 60 kV 直流電力に変換し、 5 km の直流送電用海底ケーブルでこれを高島双子変電所に送り、ここで高圧水銀変換装置によって $50 \text{ c/s } 3,300 \text{ V}$ 交流にふたたび変換し、自家発電力とともに島内負荷に給電するものである。(図 6.2 (a) (b) 参照)

直流送電電力は 50 kV , $7,500 \text{ kW}$ で比較的小規模であるが、送電と同時に周波数変換も兼ねているため、交流送電に比して経済的に有利となり、また大電力直流送電のテストプラントとして非常に重要な意義を有している。

表 6.1 計画概要

(1) 送電電力	7,500 kW
(2) 送電端	三菱鉱業岳路変電所(九州本土) 三相 $60 \text{ c/s } 66 \text{ kV}$
(3) 受電端	三菱鉱業双子変電所(長崎港外高島) 三相 $50 \text{ c/s } 3.3 \text{ kV}$
(4) 送電線	60 kV 直流送電用海底ケーブル 車心、1 条、紙絶縁二重鉛被線鋼絞線、補路は既設交流ケーブルを使用、(大地電位)、海水補路の試験も実施する。
(5) 変電設備	
A. 岳路変電所	
建 屋 既設交流変電所を併築 約 32 坪	
主要機器	
・がいし形遮断器	$66 \text{ kV } 600 \text{ A}$ 1 台
・主変圧器	$4620 \text{ kV}/22 \text{ kV}$ 2 台 一次直列、二次直列として使用する。
高圧イグナイトロン整流器および付属装置	1 組 6 タンク $60 \text{ kV } 150 \text{ A}$
直流リアクトル	$60 \text{ kV } 150 \text{ A } 0.75 \text{ H}$ 1 台
制御装置(自動制御装置付)	1 式
遠方監視制御装置(予受電所用)	1 式 ・印は既設設備を流用
B. 双子変電所	
建 屋 既設交流変電所改築 約 41 坪	
主要機器	
磁気遮断器	$3,450 \text{ V } 2,000 \text{ A}$ 1 台
主変圧器	$9,000 \text{ kVA } 3.3 \text{ kV}/40.5 \sim 20.25 \text{ kV}$ 1 台 負荷時タップ切替装置付
高圧イグナイトロンインバータおよび付属装置	1 組 6 タンク $60 \text{ kV } 150 \text{ A}$
直流リアクトル	$60 \text{ kV } 150 \text{ A } 0.75 \text{ H}$ 1 台
制御装置(自動制御装置付)	1 式
遠方監視制御装置(親変電所用)	1 式



図 6.1 三菱鉱業株式会社高島鉱業所略図

Fig. 6.1 Map of Mitsubishi Mining Co. Takashima plant.



図 6.2 (a) 岳路側より高島双子側を望む

Fig. 6.2 (a) Takashima viewed from Takashima side.



図 6.2 (b) 高島双子島より九州本土岳路側を望む

Fig. 6.2 (b) Kyushu mainland viewed from Takashima side.

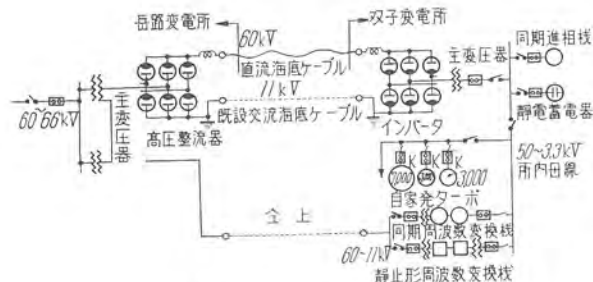


図 6.3 高島直流送電概略系統図

Fig. 6.3 Block diagram of Takashima DC power transmission.

表 6.2 試験研究の経過

試験項目 年月日	60 kV 直流送電装置の試作 ならびに工場試験		試作装置の三菱鉱業高島 鉱業所における実用試験	
	実 績	予 定	実 績	予 定
昭和28年 4月	開 始	開 始		
" 5 "	直流送電模擬 セット完成			
" 6 "	本格的基礎研 究の着手			
" 7 "				
" 8 "				
" 9 "				
" 10 "		設計完了 (28. 11. 30)		
" 11 "				
" 12 "	高圧イグナイト ロン設計完了 (製作中)			
昭和29年 1月		60 kV イグナイ ترون試作完了 60 kV 周波数変 換器試作完了		
" 2 "				
" 3 "				
" 4 "				
" 5 "				
" 6 "				
" 7 "				
" 8 "				
" 9 "				
" 10 "	高圧イグナイ ترون3タンク組 立完了			
" 11 "				
" 12 "				
昭和30年 1月	第1次工場試験 (3タンク試験) 完了			
" 2 "	順変換装置組立 完了			
" 3 "				
" 4 "				
" 5 "				
" 6 "	逆変換装置組立 完了			
" 7 "	第2次工場試験 実施			
" 8 "				
" 9 "	制御用伝送回路 改造			
" 10 "				
" 11 "			現地試験用 上屋工事完了	
" 12 "				
昭和31年 1月	第3次工場試験 (順変換装置試験)			
" 2 "				
" 3 "				
" 4 "				
" 5 "	陽極リアクトル 製作			
" 6 "	第4次工場試験			
" 7 "				
" 8 "	高圧イグナイ ترون一部改造			
" 9 "	第6, 第6次工 場試験			
" 10 "	第7次工場試験 電動発電機 手直し			
" 11 "	制御回路改造			
" 12 "				
昭和32年 1月				
" 2 "				
" 3 "				
" 4 "	第8, 第9, 第10 次工場試験	工場試験完了		
" 5 "	工場試験完了		機器発送手入 機 器 発 送	機器発送手入 機 器 発 送
" 6 "			岳路側機器 発送	現 地 据 付
" 7 "				
" 8 "				
" 9 "				
" 10 "			双子間機器 発送 変電所 据付完了	現 地 試 験
" 11 "			双子変電所 据付完了 低圧化成・調整 同 上	耐 用 試 験
" 12 "				
昭和33年 1月				
" 2 "				
" 3 "			現地試験完了	

図 6.3 はこの送電系の概要結線図を、表 6.1 に計画概要を示す。

6.2 試験研究の経過

当社では早くから直流送電の研究に着手し、高圧イグナイトロンの試作研究を行うとともに、直流送電回路の模擬セットを製作し、制御方式、保護方式について、研

究を行ってきたが、高島直流送電計画については、すでに昭和26年に立案され、数次の検討改訂が加えられ、昭和28年工業化助成金の交付認許とともに、試作が開始された。

29年末装置の主要部を完成し、その後32年5月までに工場において前後11回の試験を重ねて慎重に研究を進め、32年6月には現地すえ付を開始する段取りとなり、32年12月にすえ付工事が完了した。33年始めからイグナイトロンの化成、全装置の調整、予備試験を行って3月中旬には送電準備完了、3月18日待望の実負荷送電が開始された。3月24日福岡通産局始め関係先の立会のもとに、公開試験を行って、好成績を収め、その後現在まで大過なく送電を継続している。表6.2に現在までの試験研究経過の一覧表を示す。

6.3 機器の概要

(1) 高圧変換装置 (図6.4, 6.5 参照)

図6.4, 6.5はこの外観を示す。これらに見られるように単陽極形整流器6本からなり、三相グレート回路として使用し、各高圧整流器は排気装置、器側制御盤および電圧分割装置などの付属装置とともにタンクベッド上にある。タンクベッドは中間電位ベッド上に絶縁されて接続に便するように配置されている。中間電位ベッド上には他に絶縁変圧器、異常電圧吸収装置などがあり、大地から絶縁され、主変圧器中性点電位にある。

これらは順逆両変換装置とも同一で、各高圧整流器はイグナイトロン形で小形となっており、ポンプ付で冷却方式は循環油冷式である。循環油は風冷式再冷却器冷凍器および加熱器によって、自動的に一定の適温に保たれるようになっている。図6.6はこの高圧イグナイトロンの内部構造を示す。陽極部はもっとも重要な部分で円筒上がい管内の上部に陽極があり、その下方に5個の皿状中間陽極と2個の制御格子がある。中間陽極は前記電圧分割装置によって陽極—陰極間の高電圧を均等に分割する作用をし、陰極部には2個のイグナイトが陰極水銀溜に浸漬されており、他に1個の補助極、浮遊格子がある。

高圧変換装置としての整流タンクはもちろんもっとも確実な制御能を必要とするものであるが、このタンクでは2個の格子に正電位を与えると同時にイグナイトにより陰極輝点を生成し、点弧位相の確実な制御を行っている。補助極は毎サイクル陰極輝点の生成によって、点弧し、内部イオン化を促進し、陽極の点弧を容易ならしめる。

なお、2本のイグナイトの使用は万一1個のイグナイトが陰極輝点の生成に失敗した場合、ただちに第2のイ

直流送電・木村

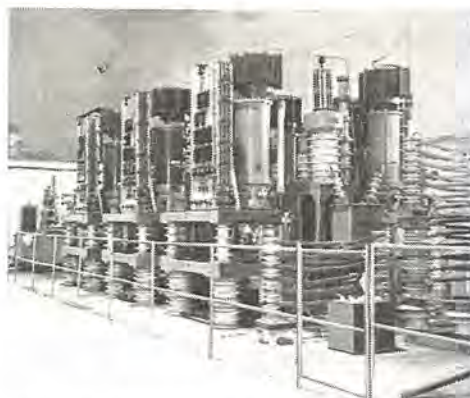


図 6.4 高圧イグナイトロン整流器 (岳路側)

Fig. 6.4 DC ignitron rectifier.



図 6.5 高圧イグナイトロンインバータ (高島側)

Fig. 6.5 DC ignitron inverter

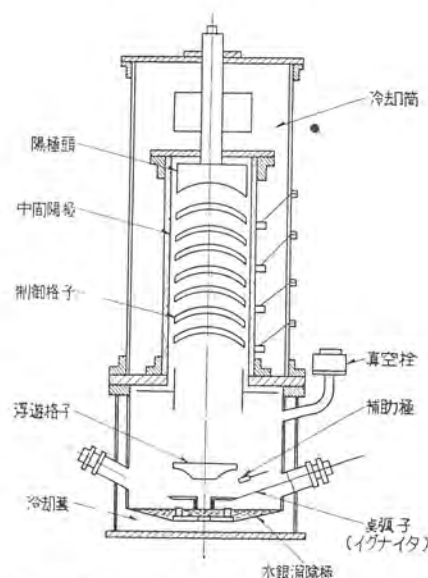


図 6.6 高圧イグナイトロン内部構造図

Fig. 6.6 High voltage ignitron interior construction.

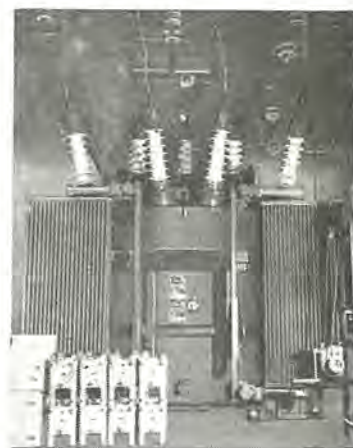


図 6.7 主変圧器

Fig. 6.7 Main transformer.

グナイトで点弧させるためで、これによって失弧による転流失敗あるいは異常電圧の発生を防止することができる。

(2) 主変圧器 (図6.7 参照)

一般電力用変圧器と違いはない。インバータ用のもの



図 6.8 直流リアクトル

Fig. 6.8 DC reactor.

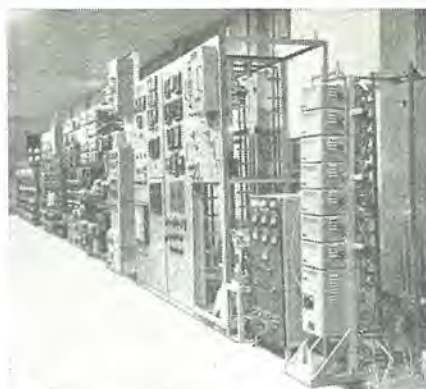


図 6.9 制御用配電盤 (高島双子変電所)

Fig. 6.9 Control panel.

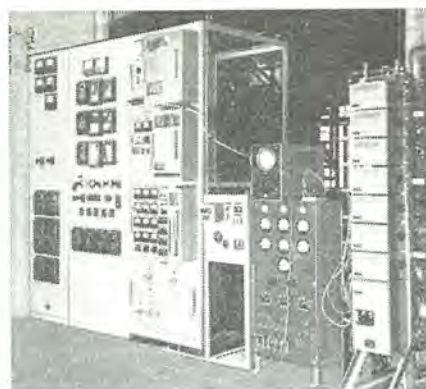


図 6.10 制御用配電盤 (岳路変電所)

Fig. 6.10 Control panel.

には負荷時電圧調整装置が付けてあり、位相制御と併用して送電電力の調整を行う。なお試験運転に便利のように巻線は直並列切り替えられるようになっている。

(3) 直流リアクトル (図 6.8 参照)

送受両変電所に設置され直流電流を平滑化するとともにインバータおよびケーブルなどの短絡時の故障電流を抑圧する作用を有している。

(4) 制御保護装置 (図 6.9~6.11)

点弧回路、格子回路などはすべて高圧整流タンクと同一電位の器側制御盤内にあり、この電力は絶縁変圧器を介して供給される。各タンクの真空、温度および回路などの異常はこの器側盤で警報表示される。

一方変換装置の起動停止、位相制御は大地電位にある制御盤によって総括的に行われる。位相制御の信号パルスは高周波に変調されて高耐圧結合コンデンサを経て大地側から高電位タンクに送られる。

また総括制御、監視は既設交流ケーブルを利用した搬送波により受電端高島の双子変電所で行いうるようになっている。

送電電力は自家発と並列運転されるが、この電力分担は自動制御装置により行われる。

変換装置の逆弧、転流失敗、あるいはケーブルの短絡などに対しては電子管装置よりなるきわめて即応度の高い急速消弧装置、位相制御装置によりただちに遮断処理され自動的に再開路なども行われる。たとえば転流失敗などの場合は 0.3 c/s 程度で故障電流を遮断し、3~4 c/s で自動的に再開路される。

また恒久的故障などにより再開路が繰り返される場合は全装置を遮断してロックするようになっている。

7. む す び

以上高島直流送電装置についてきわめて簡単に紹介した。この装置は高島の需要電力の関係で容量は小であるが、ゴットランド島の場合のようにこの装置を拡大して、



図 6.11 遠方監視制御継電器盤

Fig. 6.11 Supervisory control relay panel.

変換装置を 2 組または 4 組直列接続とすることによって、なんら困難なく送電電圧を 100 kV 200 kV とすることができる。また電流に対しては整流タンクを並列とすることによって 500 A 程度までは技術的に容易に増大することができる。したがって今回の高島直流送電の成功によって、10 万 kW の直流送電の技術的裏づけができ、わが国の電力送電技術に躍進を加えることができたことは誠に同慶に堪えない。

高島直流送電計画以来 6 ヶ年間、幾多の技術的、経済的困難と戦いながら孜々として研究を続けた当事者の苦労もさることながら、通産省、工業技術院、公益事業局東京、大阪、福岡各通産局の理解あるご後援のもとに、電気試験所、中央電力研究所、九州電力、三菱鉱業、古河電工などのなみなみならぬご協力によって、始めてこの輝かしい成果を収めうることができたわけで、ここに厚く感謝の意を表する次第である。

われわれもますます努力研鑽を重ねて研究の成果をよりいっそう高める覚悟であるが、この上ともご支援、ご鞭撻をお願いする次第である。

発電機の接地方式

本社 山田 栄 一*

Grounding System of Generators

Head Office Eiichi YAMADA

The grounding of generators involves much more complicated problems than that of transmission lines and affects the surrounding in a wide range. The protection of generator consists in minimizing the system and the apparatus connected in it in case of faults and in clearing out the faults as soon as possible by detecting them. Proper care must be taken not to impose excessive stress due to fault currents to generator coils and to safeguard the care by suppressing them. It necessitates the employment of selective relays. The grounding system and the constant of power system are to be properly selected not to cause abnormal voltages generated by switching surges or arcing ground and induce faults and flash over to other portions of the system.

1. ま え が き

発電機の接地は、送電線の接地よりも問題が複雑であり、その影響する範囲は非常に広い。

発電機の故障保護に関しては二つの問題点がある。その第一は事故の際に系統ならびに系統にある機器の損傷を最小にすることであり、第二に事故を検出して、できるだけすみやかにその事故を除去することである。

事故電流によって、発電機巻線に過大なストレスを生じないように、またコアの損傷を最小とするように、事故電流が過大にならないようにすることが必要である。そのためには選択リレー方式を採用し、また接地方式および系統の定数は、開閉サージや弧光接地事故により発生する過渡異常電圧が、系統の他の部分に事故や閃路を惹起させないようにしなければならない。以下 W 社の Reference Book にある事項に基づいて、発電機の接地方式について概説を行う。

2. 発電機の接地方式に関する諸問題

2.1 発電機の接続方式

図 2.1 はいわゆる単一方式 (Unit System) であって、Y Δ 変圧器を通して、個々の発電機が直接線路に接続されており、発電機の接地電流に関するかぎりお互いに独立しており、他の接続方式が接地の選択に関して種々の束縛があるのに比して最も単純である。また 2 台の発電機が 1 台の変圧器に接続される場合もある。図 2.2 は変

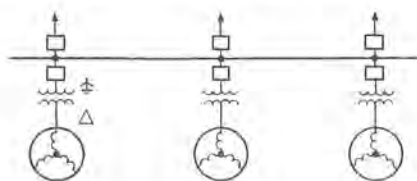


図 2.1

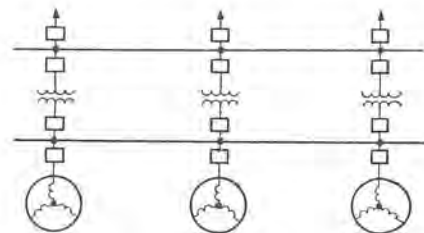


図 2.2

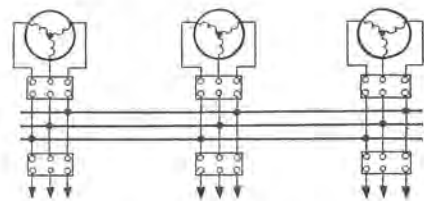


図 2.3

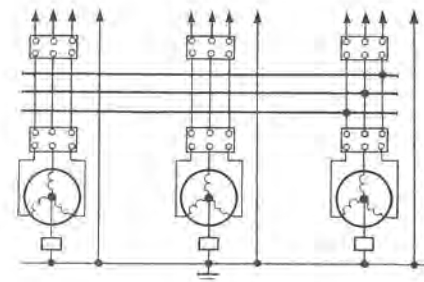


図 2.4

圧器の高圧側および低圧側にそれぞれ共通母線がある場合であって、おのこの発電機は並列に接続されており、したがって接地電流については関連がある。図 2.3 は、発電機電圧で送電する場合、図 2.4 も、同じく発電機電圧で送電する場合であるが、配電線路が四線式である点がちがっている。図 2.5 は発電機電圧を昇圧するために単巻変圧器を使用した場合の接続を示す。

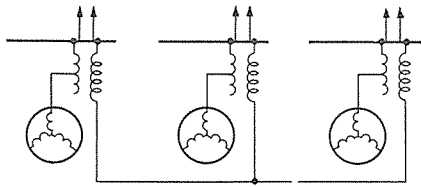


図 2.5

2.2 接地電流

一線接地時の故障電流は

$$I_F = (I_0 + I_1 + I_2) = \frac{3E_g}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad \text{である.}$$

もし Z_0 が一般の線路におけるように Z_1 や Z_2 よりも小さいならば、一線接地時の故障電流 (I_F) の値は、三相故障電流 E_g/Z_1 よりも大きくなる。もし何台かの発電機が並列運転していて、ただ1台だけが中性点を接地されている場合には、この発電機に過大な接地電流が流れる危険性がある。また機械的のストレスは、電流の自乗に比例するから、ストレスは大きくなり、注意を要する。

何台かの発電機が並列に接続されている場合 (すべての発電機の中性点は接地されている。) に1台の発電機が一線接地事故を生じた場合の故障電流は、三相短絡電流より常に大きい。そうしてその値は並列台数の数が増せば増すほど荷重となる。一線接地時の発電機巻線の故障電流を三相短絡電流の大きさに押えるため、中性点に挿入すべきリアクタの大きさを決定するための計算式を表 2.1 に示す。

表 2.1

(1)	$X_R = \frac{S_0(X_1X_2 + 2X_1S_2 - X_2S_2) + X_0(X_1S_2 - X_2S_2 - S_2S_0 - S_0S_2)}{3(X_2S_0 + X_2S_2 - X_1S_2 + S_0S_1)}$
	$I_R = \frac{300eS_0}{(X_0 + S_0 + 3X_R) \left(\frac{X_1S_1}{X_1 + S_1} + \frac{X_2S_2}{X_2 + S_2} + \frac{S_0(X_0 + 3X_R)}{X_0 + S_0 + 3X_R} \right)}$
(2)	$X_R = \frac{X_1 - X_0}{3} + \frac{S_2(X_1 - X_2)}{3(X_2 + S_2)}$
	$I_R = \frac{300e}{\frac{X_1S_1}{X_1 + S_1} + \frac{X_2S_2}{X_2 + S_2} + X_0 + 3X_R}$
(3)	$X_R = \frac{X_1 - X_0}{3}$
	$I_R = \frac{300eS_0}{X_1(X_1 + S_0)} \left(\frac{1}{\frac{S_1}{X_1 + S_1} + \frac{S_2}{X_1 + S_2} + \frac{S_0}{X_1 + S_0}} \right)$
(4)	$X_R = \frac{X_1 - X_0}{3}$
	$I_R = \frac{300e}{X_1} \left(\frac{1}{\frac{S_1}{X_1 + S_1} + \frac{S_2}{X_1 + S_2} + 1} \right)$
(5)	$X_R = \frac{X_1 - X_0}{3}$
	$I_R = \frac{300e}{X_1} \left(\frac{X_1 + S_1}{X_1 + 3S_1} \right)$

注) X_1 : 発電機正相リアクタンス
 X_2 : " 逆相 "
 X_0 : " 零相 "
 S_1 : 系統の正相リアクタンス
 S_2 : " 逆相 "
 S_0 : " 零相 "
 e : 発電機電圧
 X_R : 中性点リアクタのリアクタンス
 I_R : 中性点電流

備考: 場合に応じ、(1)~(5)式により計算する。(1)は最も正確なる算式である。

2.3 中性点の変位 (Neutral Displacement)

接地故障が発生した場合、中性点が変位して健全相の電圧が上昇して、他機器に及ぼす影響が大きい。この現象はすでに幾多の実測により、あるいは理論的に議論されているところである。

2.4 微環高調波電流

図 2.6 に示されるように2台の発電機が並列で運転している場合、高調波電流の流れる可能性がある。もし2台の同じ発電機が並列で運転している場合には、同じ大きさおよび位相の高調波電圧を発生し、互に相殺するために、その合成高調波電圧は零となり、外部には現れない。しかしながら、発電機の定格がちがっている場合

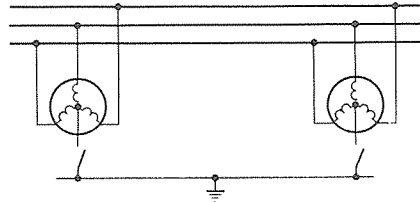


図 2.6

には、これらの発電機の間次式に示すような高調波電流を生じる。

$$\text{高調波電流} = \frac{\text{(合成高調波電圧)}}{\text{(その周波数に応じた閉回路インピーダンス)}}$$

もし2台以上の発電機が並列運転の場合には、リアクタンスは、1台の発電機のリアクタンスが、他の並列リアクタンスと直列に接続されたことになり、もしそれぞれの発電機が高調波電圧を発生している場合には、それぞれの高調波の位相のわずかなずれによって、合成高調波電圧の大きさは大きく変わるから、これを求めることは非常に困難である。

中性点を通る高調波電流に関しては、第3、第9、第15、第21の高調波電流しか存在しないという以外は、上に述べた事項とまったく同様である。中性点を通る高調波電流は、相を通るものより幾分大きい。その理由としては、つぎのことがあげられる。すなわち第3、第9、……の高調波電圧は他のものよりも一般に大きく、また零相リアクタンスは逆相リアクタンスよりも小さい。しかしながら2/3ピッチ巻線の発電機の場合には、第3、第9、……の高調波電圧はほとんど発生しないけれども、一方このような発電機においては、零相リアクタンスは非常に小さくなるので、他の発電機において生じた第3、第9……の高調波電流の通路となる。

発電所内の他の機械を環流する高調波電流はその大きさがそれほど大きくなければ、それほど問題はない。たとえば30%の中性点高調波電流が流れたとしても、各相の高調波電流はその1/3の10%となり、したがってその場合の電流の実効値は全負荷電流(100%)に対して、

$$\sqrt{100^2 + 10^2} = 100.5\%$$

となる。熱的影響はこれより少し大きいけれども、たいてい問題とはならない。

2.5 通信線への影響

発電機の中性点が接地してある場合には、送電線路に向って、3 倍高調波電流が出て行く。この電流はある深さの大地帰路を通るので、相間を環流する高調波電流よりも通信線に対する誘導障害が大きい。

通信線路に対する影響を減少させる対策としては、高調波を発生している発電機の接地をとり除くことであり、そのためには選択接地リレーが必要である。また中性点にフィルタが設置される場合もある。

2.6 過渡異常電圧

今まで過渡異常電圧に関して多くの実測が行われてきた。しかしながら、一般にこのような実測あるいは試験にて測定された異常電圧値は、純理論的の値、あるいは過渡現象解析機による値よりも低いといわれている。その値はまれには定常値の3 倍をこえることもあるが、地絡弧光の現象は誠に複雑であるから、その最大値を求めることは困難である。避雷器によって、このような異常電圧を保護することは苛酷なことであるが、避雷器はこのような状態において、しばしば動作している。この異常電圧防止対策として一番良い方法は、異常電圧が発生しないように系統を改善することで、つぎに述べるような接地方式にすれば、一般に異常電圧を押えることができる。

イ. 発電機の中性点にリアクタを挿入する場合には、発電機端子における X_0/X_1 の値を 3 あるいはそれ以下に選ぶべきである。

ロ. 発電機の中性点に抵抗を挿入する場合には、接地故障時にその抵抗を流れる電流が、この抵抗のない場合、一線接地時に流れる充電電流に等しいか、あるいはそれ以上であるように選ぶべきである。しかし発電機の中性点を流れる電流の最大限は、電力損失をさける観点から定められ、その値は全負荷電流の $1\frac{1}{2}$ 倍あるいはそれ以下の値に普通選ばれる。そうして X_0/R_0 の値は 1.0 を越えない方がよい。

2.7 発電機の継電方式

発電機の保護リレーの適用にあたっては、その発電機の接地について考慮する必要がある。大きな発電機は差動継電機を備えており、発電機内部の相間故障に対しては有効に動作する。またその発電機が有効接地されている場合には、接地故障に対しても良く働く。発電機が高インピーダンスを通して接地されている場合には、接地故障の場合、差動継電機の検出能力は低下し、この現象は、その故障点が中性点の近くにある場合ほどはなはだしい。それでその場合には、小さな零相電流によって動作するような補助リレーを設置する必要がある。

発電機が直接送電線に接続されている場合には、それに応じた接地方式を考慮する必要がある。欧州で用いられている接地方式は、接地故障電流を 50 A 付近に制限するようにしてある。600 A あるいはそれ以上の負荷電流を有している母線においては、感度の高いリレーが必要となってくる。このようなリレーは可能ではあるけれ

ども、それに使用する CT の選択と整定および保守に注意しなければならない。米国においては、母線の全負荷電流に等しいか、あるいはそれ以上の故障電流を流すような普通の接地方式が採用されている。適当な大きさのリアクタ接地の場合には、リレーの動作に十分な大きさの電流を得ることができるが、非接地または、変圧器の二次側に抵抗を結合した接地の場合には、十分な電流を得ることは困難である。

2.8 発電機故障点の損傷

発電機の内部に故障が発生した場合、故障を生じたコイルは取り替えなければならない。もしステータ鉄心を取り替えるとか、積替えをしなければいけないことにもなれば問題は大きい。研究所における研究あるいは現場試験の結果によれば、故障電流の大きさ、故障継続時間および鉄の溶融点の関係から、コアが溶融することはまれであるという結論が出ている。

2.9 発電機中性点用遮断器

発電機の内部に故障が発生した場合には、発電機のアーマチュアおよびフィールドを遮断し、タービンの入力を遮断する。しかしながら、発電機の界磁消滅には、ある時間を要するから、故障電流はすぐ零にはならない。中性点用遮断器を設置し、これを自動的に飛ばすことによって、故障電流をすみやかに遮断することができる。しかして、故障電流が小さい場合には、中性点用の遮断器はあまり有用ではない。

2.10 中性点接地装置の時間定格

接地リアクタが単一系統 (Unit System) に用いられる場合、発電機の熱容量と調和をとり、またこのような操作は繰り返されることはないので、時間定格は 10 秒が普通採用される。

発電機側に母線を有する接続方式の系統に用いられる接地装置 (接地抵抗、リアクタ、接地変圧器) は、母線の繰り返し故障に対して、またどの相に故障がおこった場合にも、その装置に故障電流が流れるから、1 分間定格が普通採用される。ポールトランス抵抗接地方式が使用される場合、抵抗は安価なものであるから、連続定格を採用した方がよい。

2.11 衝撃電圧侵入時の発電機巻線内の電位分布

発電機の中性点接地の状況により、サージが侵入した場合の発電機内部の電位分布が異なるのはもちろんである。今まで多くの発電機について数多くの現地測定が行われ、サージ侵入時の特性は或る程度明らかにされている。以下 2, 3 の実測結果を示す。

(1) 住友共電高藪発電所の実測結果 (図 2.7 参照)

立て軸開放形 6,625 kVA, 電圧 11 kV
回転数 720 rpm, 極数 10 極, 二重星形
昭和四年 三菱電機製
サージが一線より侵入した場合

(a) の場合

U の最大値 110% 中性点 45%

(b) の場合

発電機の巻線中 100% 以上となる所はない

中性点 0%

(c) の場合

巻線中で 100% 以上になる所はない

中性点 10%

サージが三相より侵入した場合

(d) の場合

U の最大値 100% 以上

中性点 180% 位

(e) の場合

U の最大値 100% 以下

中性点 0%

(f) の場合

U の最大値 100% 以下

中性点 27% 位

(2) 東北電力深沢発電所 2 号機の実測結果(図 2.8 参照)

定格 1,000 kVA 三相 3,500 V 165 A

極数 10 極 回転数 720 rpm 横形

二重星形 大正 15 年 11 月 三菱電機製

一線よりサージが侵入した場合

(a) の場合

侵入サージの波形

($1.5 \times 40 \mu\text{s}$) の時 中性点の電位 47.2%

($17 \times 90 \mu\text{s}$) の時 " 28.6%

(b) の場合

($1.5 \times 40 \mu\text{s}$) の時 巻線内の電位は印加端より直線的に低下し、中性点 0%

三線よりサージが一括侵入した場合

(c) の場合

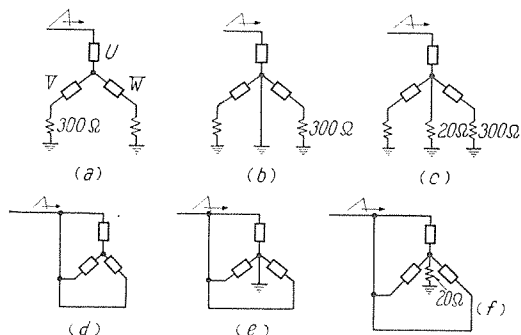


図 2.7

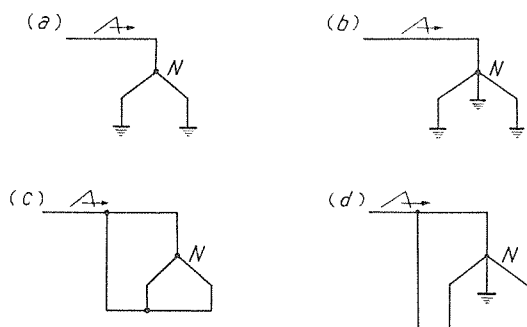


図 2.8

侵入サージの波形

($1.5 \times 40 \mu\text{s}$) の時 中性点の電位 126% 位

($17 \times 110 \mu\text{s}$) の時 " 98% 位

(d) の場合

($1.5 \times 40 \mu\text{s}$) および ($17 \times 50 \mu\text{s}$) の時

巻線内の電位は 100% から 30% まで直線的に低下する。

以上の実測例からもわかるように、中性点非接地の場合には、三相よりサージが一括侵入したような場合には、180% あるいはそれ以上にも達することもあり、巻線の絶縁に対して相当の脅威となることは事実であり、この点から見た場合、中性点を低い抵抗にて接地すること、あるいは直接接地することは、発電機のサージ特性より見て有利であることは明らかである。

中性点接地方式は、そこに使用される避雷器の定格と関連があり、もし非接地系統であれば、100% 避雷器が必要である。スペースと価格のために、同一電圧階級の油入機器と同様の絶縁を行うことは発電機にはできない。それで非接地あるいは高インピーダンス接地の場合には、保護裕度が減少する。しかしながら、これは回転機用の避雷器およびサージ吸収用の蓄電器を使用することによって或る程度救われる。

3. 発電機の接地方式の実際

3.1 単一方式 (Unit System)

直接接地の場合には、接地故障電流は、三相短絡電流よりも一般に大きくなるから、発電機巻線の強度の点から、一線地絡電流が三相短絡電流よりも小さくなるように、十分インピーダンスを通して中性点を接地することが推奨される。

高抵抗を得るもっとも経済的な方法は、ボルトトランスの二次側に低圧用の抵抗を挿入することである。この接地方式では故障電流を制限することができ、したがって巻線の変歪およびコアの損傷も少ない。もし事故中における抵抗の kW ロスが充電 kVA に等しいかあるいはそれより大きいならば、異常電圧を許容値以下に押えることができる。またこの方式においては、リレーの選択性については問題はない。

この方式には図 3.1 に示すような三つの接続がある。

(a) は PT 1 個が中性点に接続されているが、(b) は、三つの PT が Y に接続されており、(a) より鋭敏に整定

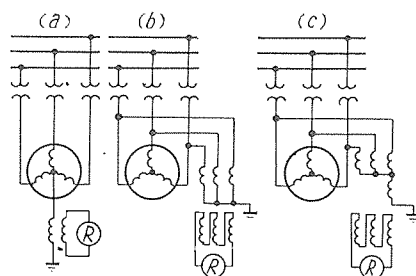


図 3.1

することができ、また PT の一次側が開路になった場合にもリレーが動作する。さらに (a) 方式において、母線および変圧器の容量が大きな場合には中性点に残留高調波電圧が表われる欠点があるが、(b) 方式においては、これを除くことができる。しかしながら、これらの方式はともに、故障が中性点の近くに発生した場合に保護感度が落ちる欠点があるが、発電機における故障は一般に線路端の近くに発生することが多いから、このことはそれほど支障とはならない。巻線内のいかなる個所に故障が発生した場合においても、完全に保護することができるように、(c) に示すような接続が、R. Pohl 氏によって推奨されている。この方式においては、巻線のいかなる点に故障が発生した場合においても、リレーには電圧が現われ、保護することが可能である。しかしこれら接地検出リレーは、一般に差動継電器と併用するのが普通である。故障が変圧器の高圧側に発生した場合には、変圧器の一次、二次間の零相容量結合によって、誤動作のおそれがある。すなわち、接地故障による高圧側の零相電圧は低圧側に分圧されて、接地検出リレーに電圧がかかる。その電圧の大きさは変圧器の変圧比、巻線の形状、故障発生場所、リレーのバードンなどによって決まる。一般に変圧器が大きくなり、電圧が高くなれば、誤動作のおそれが多くなる。dummy load をリレーと並列接続し、またインピーダンスの低いリレーを用いることによって、この誤動作を防止することができる。

図 3.2 は中性点非接地をさけるために配電用変圧器を接地に利用した方式であって、変圧器の二次側には抵抗およびリレーが接続されている。しかしこの変圧器や抵抗の大きさは、一線接地時の充電電流によって決定される。

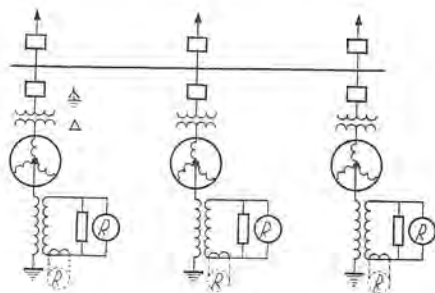


図 3.2

表 3.1

時 間	Over load factor
1 分	4.7
5 分	2.8
30 分	1.8
60 分	1.6
120 分	1.4

弧光状態の故障時における過渡異常電圧に関して抵抗器の大きさを決定する研究が、過渡現象解析器によって

発電機の接地方式・山田

行われた結果、一般に抵抗器中において消費される電力が増加するにつれて、過渡時の異常電圧は減少するけれども、抵抗内のエネルギー損失を極度に増しても異常電圧はそれほど減少しないことがわかった。

故障時の電流の値は、容量分と抵抗分のベクトル和であるが、もし抵抗分を容量分と同じにすれば、その和は、容量分電流の 1.41 倍となる。抵抗分が容量分より大きくなれば、過渡異常電圧はいくらか減少するが、弧光中のエネルギーが増加するために、損傷は大きくなる。故障発生状態において、抵抗分と容量分とを等しくするか、あるいはごくわずかに大きくすることが、一般的の基準となりつつある。また中性点接地用変圧器の容量は次式によって決定される。

$$\text{変圧器 kVA} = \frac{\text{一次電圧} \times \text{一次電流}}{\text{over load factor}}$$

ただし over load factor は表 3.1 のとおりである。

しかし変圧器の定格一次電圧は接地瞬時の過渡励磁突流を考慮して、発電機の相電圧 $\times 1\frac{1}{2}$ とすべきである。

3.2 高圧および低圧側に母線を有する方式

並列に接続されている発電機がすべて非接地であれば、接地事故を発生した発電機を判別することはできないので、その保護対策としていろいろの方式があるが、もっとも普通の方式は中性点母線を設けて、その母線を接地抵抗を通して接地することであり、その抵抗器の値は、もっとも小さな発電機の全負荷電流の 0.5~1.5 倍に接地電流をおさえるように選ぶ。

低圧母線に接続される接地変圧器は、リレーの動作電流を得る電源用として設置されるが、 X_0/X_1 を 3 以下に保つことは困難であり、したがって苛酷な過渡異常電圧を発生することになる。

3.3 三相三線方式

接地故障を別個に選択するためには、この種の系統においては、ある方式の接地が必要である。ケーブル配線のような場合には、中性点の変位を防ぎ、弧光地絡を抑制するために、相当低いインピーダンスにて接地する必要がある。多くの発電機が同時に使用されない場合においても接地ができるようにするためには、個々の発電機を接地することが望ましく、また中性点母線が設けられれば、この母線を抵抗またはリアクタを通して接地すれば良い。

通信線に対する誘導障害の影響は、予測することは困難であるが、発電機の中性点に並列共振フィルタを挿入することによってこの問題は解決できる。

3.4 発電機電圧による送電（三相四線方式）

この方式における一般的の問題は、三相三線式系統におけると同様であるが、負荷は相と中性点との間にかかるから、接地故障時の中性点の変位はとくに問題である。

さらに一線接地事故の場合には、他の相の電圧が上がり、電灯、ラジオおよびその他の電気機器に悪影響がある。それで、故障時の接地電流を抑えるに必要な最小限度以上には中性点にインピーダンスを挿入しないことが、四線方式においては肝要である。(図3.3参照)

すべての発電機が接地されていて全系統の X_0/X_1 の値が 1.0 以下であるならば、相電圧は普通の値以下になり、負荷も安全である。また接地故障の際に相電圧がいくらか高くなったとしても、それは一時的であるから、 X_0/X_1 の値は 1.5~2.0 位で良いかもしれない。

図3.3(a)の接続は電流制限の作用はなく、不平衡負荷に対する中性点の変位および電圧変動の防止に役につく。(b)および(c)接続では、中性点のインピーダンスは接地電流を減少させるのに効果があり、(b)は(c)よりも不平衡負荷に対していくらか電圧変動の点は良い。

個々の発電機の接地電流を抑え、中性点の変位を防ぐために、最も良い方式は各発電機に接地装置を設けることであり、中性点用遮断器は発電機の運転、停止にかかわらず、閉じたままにしておいて、発電機事故の場合にだけ開くようにする。また四線方式においては X_0/X_1 の比は小さくすることができから、弧光接地時の異常電圧発生のおそれは少ない。

3.5 単巻変圧器を使用して発電機電圧を昇圧送電する方式 (図3.4参照)

この方式は米国においては地下ケーブル配電システムなどに広く用いられている。3 倍高調波はすべての線路に出て行くけれども、ケーブルを使用すれば、通信線路への誘導障害は少ない。発電機と変圧器の間が相当離れており、とくに通信線が並行しているような場合には変圧器の励磁電流および発電機循環電流が誘導障害を及ぼすから注意を要する。

図3.4(a)接続は発電機は非接地で単巻変圧器は接地で、△三次巻線が設置してある。これは誘導障害は最小で、故障時の電圧の安定度も一番高いが、発電機の差動保護特性は、中性点の近くにおける事故の場合には鋭敏ではない。

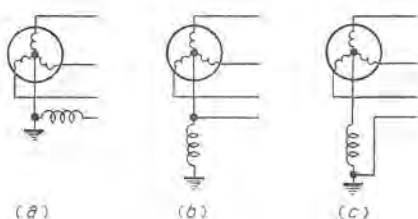


図 3.3

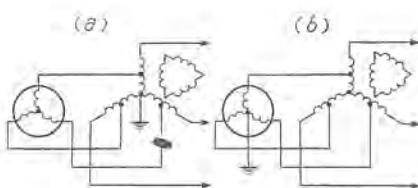


図 3.4

図3.4(b)接続は発電機が接地で単巻変圧器が非接地の場合である。この接続では3 倍高調波電流が外部線路に出て行くが、発電機の差動保護方式には都合が良く、また線路の電圧は接地事故時においても安定である。

もし発電機も単巻変圧器もともに非接地の場合には、変圧器の高圧側における接地事故の場合においてさえも発電機の絶縁は過渡のストレスをうけるから、この接続は採用されない。もし単巻変圧器の高圧側が有効接地系統に接続されているならば、(同一発電所内に接地 Y-△変圧器があるような場合) 発電機の中性点が接地の場合にも非接地の場合にも三次巻線をはぶくことができる。発電機の中性点は系統の接地故障の場合に変位するけれども、発電機の絶縁に対しては過渡のストレスとはならない。

一般に変圧器の高圧側における接地事故に対しては、発電機電流は許容値を超過することはないが、低圧側の故障の場合には、中性点と大地の間にリアクタを挿入しなければ、許容値を超過する可能性がある。

4. 発電機中性点の柱上変圧器接地

最近米国において、直接々地系統に接続されている unit system の発電機に採用されている柱上変圧器接地方式について、わが国においてもいろいろ研究され、検討されているところであるが、わが国のように変圧器が高インピーダンス接地で、異常電圧の発生しやすいような系統においては、この接地方式をそのまま採用することには、まだ検討すべき事項が多く残されているように思われる。

4.1 柱上変圧器接地方式を採用する利点

unit system において一線接地事故が発生した場合に、発電機を瞬時的に回路より切り離すことなく、負荷を次第にしぼって、その後で回路から切り離した方が、系統に対するショックが小さくてすむ。このような操作を行うためには、発電機の事故点の損傷をできるだけ小さくするために、発電機の中性点に高抵抗を挿入することが望ましいが、他方一線接地事故時の異常電圧抑制の面から考えると、中性点に挿入する抵抗の値は、図 4.1 に示される 3C を流れる充電 kVA に等しい Watt loss を与える値が限度であって、大体数千 Ω 程度となる。しかしこのような抵抗器を組み立てるとすれば、容積が大きくなり、高価となるので、これと等価の抵抗値を得るために、柱上変圧器を使用して、二次側に抵抗を挿入する方法が採用されるようになった。

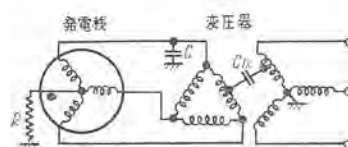


図 4.1

4.2 変圧器を通り移行する零相電圧

変圧器の高圧側が直接々地の系統においては、線路側に接地事故があった場合には、発電機側に発生する零相電圧は△結線内を環流する零相電流による電圧降下の不平衡によるものだけである。

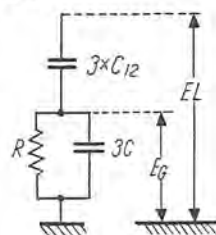


図 4.2

変圧器の高圧側低抵抗接地の場合には、高圧側中性点に発生する零相電圧 E_L が図 4.2 のように分圧されて、発電機側に発生することになる。変圧器の高圧側が非接地あるいは PC 接地の場合には、低抵抗接地の場合と同様であるが、この場合には E_L の値が大きくなるのは当然である。

4.3 線路側に発生する異常電圧の影響

開閉サージおよび弧光地絡による異常電圧は雷撃に比して波尾が長いので、発電機に挿入されたサージアブゾーバなどによっては吸収しにくい。したがって、柱上変圧器接地方式においては、柱上変圧器のリーケージインピーダンスがきいてきて、相当の高インピーダンスとなるために、発電機の中性点への移行電圧は相当高くなる。線路側にこのような異常電圧の発生するおそれの多い系統においては、中性点抵抗はできるだけ低いことが望ましい。

4.4 共振異常電圧

発電機に制動巻線がなく、線路側に一線接地を生じた場合には、高調波共振異常電圧を発生することは周知のことであるが、柱上変圧器接地の場合には、そのリーケージインピーダンスが基本波の場合に比して当然高くなる。しかしながら制動巻線を有する発電機においては、高調波共振異常電圧に関しては問題は少ない。

線路事故により基本波共振を発生するような場合には発電機側に移行する電圧は高くなるから、発電機中性点をできるだけ低抵抗にて接地することが望ましい。

4.5 柱上変圧器を用いた場合の発電機接地リレーの感度について

変圧器の中性点が直接々地であれば、発電機側に移行する電圧は非常に少ないので、発電機側の接地リレーは感度を高くすることができるが、変圧器の高圧側非接地の場合には、高圧側の一線地絡によって発電機の中性点に発生する零相移行電圧は相当高くなり、発電機の巻線

中における接地事故の際に発生する電圧との差が少なくなる。一例をあげれば端子より 90% 以下のところに発生した事故は保護できるが、95% 以上は保護不能といったことになり、誤動作を防げば、保護範囲がせまくなり、実用上おもしろくないことになる。

5. む す び

発電機の接地方式に関する問題ははなはだ複雑多岐であり、その影響するところは非常に広範囲にわたるものである。その影響する諸問題につき論じ、現在採用されている種々の発電機接続方式に対し、推奨される発電機の接地方式につき検討した。ことにそのうちポールトランス接地方式は米国においては非常に多く採用されている方式であるが、わが国のように変圧器側が高インピーダンス接地方式が多い現状においては、まだその採用に関してはいささか問題があるように思われる。図 5.1



図 5.1 徳山ソーダ発電機中性点抵抗器
発電機 7,000 kVA 抵抗値 9.5 Ω

Fig. 5.1 Neutral grounding resistor of a generator supplied to Tokuyama Soda Co.

は徳山ソーダにおける発電機に設置された低抵抗接地抵抗器を示す。この工場においては今まで異常電圧により工場内にたびたび多重絶縁事故を発生していたのであるが、この設置以後に事故を防止でき、また選択接地継電器も誤動作なく 100% 良好に動作し、優秀なる成績を示している実例がある。

以上発電機の接地方式に関し、述べたのであるがこの方面に関係ある方々に対して、いくらかでも参考となれば幸甚である。

富士製鉄・室蘭製鉄所における絶縁試験

富士製鉄株式会社室蘭製鉄所 中野 勇・永井 一 男
 本社 中村芳雄^{*1}・山田栄一^{*2}・西村鉄治^{*3}・大町久次^{*4}
 長崎製作所 米 野 俊 彦^{*5}
 研究所 原 仁吾^{*6}・川上 剛^{*7}
 伊丹製作所 影 山 隆^{*8}

Insulation Tests at Muroran Plant of The Fuji Steel Mill Co.

Fuji Steel Mill Co. Isamu NAKANO・Kazuo NAGAI
 Head Office Yoshio NAKAMURA・Eiichi YAMADA
 Tetsuji NISHIMURA・Hisaji OMACHI
 Nagasaki Works Toshihiko MENO
 Engineering Laboratory Jingo HARA・Takeshi KAWAKAMI
 Itami Works Takashi KAGEYAMA

Increasing attention is being paid to testing insulation deterioration of generators and other electric machines, and studies concerning it are being vigorously carried on by a number of committees. Though there are several methods of testing, none of them is perfect to bring dependable judgement by itself. Recently Mitsubishi has conducted, according to the request of The Fuji Steel Mill, thorough testing on the insulation of electric equipment relative to the No. 2 main generator, which is twenty years old. The tests have been made on transformers, oil circuit breakers, potential transformers, current transformers and cables as well as on the generator. The results have revealed a number of facts worthy of publication for the reference to people equally interested.

1. ま え が き

発電機その他電気機器の絶縁劣化試験に対する関心は近時非常に高まり、各所において数多くの現地試験が行われ、またこれに関する委員会なども開かれて、盛んに研究討議がなされている。

電気機器保守の上から、その機器の絶縁劣化の状況が

どの程度であるかを予知することは、万人の望むところであるが、現状としては、いずれの試験法もまだ研究の段階にあって、適格なる判定を下すことは困難なようである。すなわち測定法としては、(1) 直流試験法、(2) 絶縁抵抗計による試験法(メガ試験法)、(3) 誘導正接試験法、(4) 交流電流試験法、(5) コロナ試験法、(6) 直流分試験法(福田法)などの各種試験法があるが、いず



図 1.1 (a) 供試発電機 (27,500 kVA, 11 kV 50 s/c)

Fig. 1.1 (a) Generator tested.



図 1.1 (b) 同左ロータを抜いたところ

Fig. 1.1 (b) When the rotor is drawn out.

れもおのおの単独にては、その判定は困難であって、これら数種の試験結果による総合判定および長年連続測定を継続し、それによって経年的の変化を見て判定するのが良いとされている。

このたび富士製鉄室蘭製鉄所のご依頼により、中央発電所にある2号主発電機関係の機器に対して詳細なる絶縁試験を実施することができたので、その結果について報告する次第である。関係各方面の方々に対していささかでもご参考になれば幸甚である。

富士製鉄室蘭製鉄所の中央発電所2号発電機は設置以来約20年を経過したので、今回タービン側の点検手入に際し運転を停止する時機をとらえて、発電機側の絶縁劣化がどの程度であるか、場合によってはコイルの巻替なども問題となるのでそれに関する資料を得るために、4月3日から約1週間にわたり各測定項目について発電機をはじめ変圧器、OCB、PT、CT、ケーブルなどの絶縁試験ならびに発電機の外部点検を実施した。なお同時に仕上げ1,500HP用1,200kW直流発電機についても絶縁試験を実施したのでその結果もあわせて報告する(図1.1参照)。

2. 供試機定格

2.1 2号主発電機

27,500 kVA 11 kV 3φ 50 c/s 3,000 rpm

昭和15年2月 三菱電機製 機番 238248

主励磁機 85 kW 220 V 6極 3,000 rpm

副励磁機 1.5 kW 110 V 4極 3,000 rpm

2.2 2号主変圧器

27,500 kVA 50 c/s 3φ 11.5 kV/24 kV Δ-Y

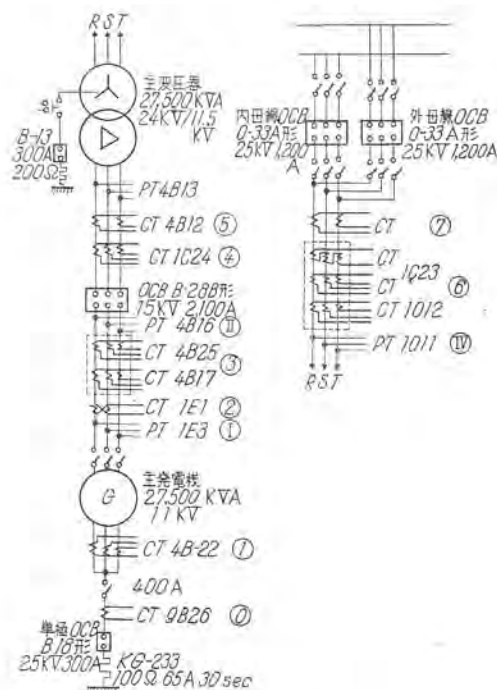


図 2.1 系 統 図

Fig. 2.1 System diagram.

昭和15年4月 三菱電機製

2.3 予備変圧器

定格その他 2.2 と同じ

2.4 OCB

B-28B形 15 kV 2,000 A 500 MVA 1台

O-33A形 25 kV 1,200 A 1,000 MVA 2台

B-18形単極 25 kV 300 A 1台

昭和15年 三菱電機製

2.5 PT

22 kV/110 V 3φ 200 VA 油入 1台

11 kV/110 V 3φ 200 VA 油入 3台

昭和15年 三菱電機製

2.6 CT

23 kV 1,000/5 A 40 VA 乾式 5台

11.5 kV 2,000/5 A 40 VA 乾式 16台

11.5 kV 75/5 A 40 VA 乾式 1台

昭和15年 三菱電機製

2.7 ケーブル

主発電機から変圧器へのケーブル 3本

2.8 仕上げ1,500 HP 用, 1,200 kW 直流発電機

1,200 kW 600 V 2,000 A 750 rpm 8極

他励複巻

昭和17年7月 三菱電機製

中央発電所2号主発電機関係の系統図を図2.1に示す。

3. 測 定 項 目

3.1 2号主発電機

(1) 固定子

試験前固定子温度を70°C程度まで上げておき、発電機停止後線路側および中性点側の結線ははずして固定子単独とし、温度の降下時を利用してつぎの各測定を実施した。

a. $\tan \delta$ (温度特性および電圧特性)

各温度において2~11 kVの $\tan \delta$ -電圧特性を測定した。高温時では三相一括で測定したが常温付近の最低温度では各相ごと測定した。

b. 直流吸収特性 (温度特性)

各温度において1 kV DCで10分間の充電電流特性および放電電流特性を測定した。(三相一括)

c. 絶縁抵抗電圧特性

常温において1 kV DCで10分間の充電特性を測定後10分間の放電特性を測定し、引続いて5 kV, 10 kVおよび15 kVで各10分ずつの充電電流特性および放電電流特性を測定し、絶縁抵抗の電圧特性を求めた。(三相一括)

d. コロナ特性

常温において各相ごとにコロナ開始電圧を測定し、引続いて11 kVまで電圧を上げて、各電圧におけるコロナパルスのおおきさと発生頻度の関係を測定した。

e. 直流分

AC 2~11 kVで電圧と直流分のおおきさの関係を測定

した。

f. 交流電流特性

AC 1~11 kV において電圧—電流特性および電圧—電流波形を測定した。

(2) 回転子

発電機停止後ブラシを上げ、温度の降下時に各温度で絶縁抵抗を測定し、常温において Rotor を抜き出す前後に $\tan \delta$ を測定した。

a. 絶縁抵抗

各温度において 100 V DC で絶縁抵抗を測定し、引続いて 150~200 V DC まで電圧をあげて測定した。

b. $\tan \delta$

常温において 100~200 V の電圧で $\tan \delta$ —電圧特性を測定した。

(3) 主励磁機

電機子について常温でつぎの測定を実施した。

a. 直流吸収特性

500 V DC で 10 分間の直流吸収特性を測定した。

b. 絶縁抵抗—電圧特性

500 V DC の測定に引続き 1,000 V および 2,000 V で絶縁抵抗を測定した。

c. $\tan \delta$

200 V AC で $\tan \delta$ を測定した。

(4) 固定子温度

固定子温度は巻線に埋込のサーチコイルのほか、発電機ケーシング内のダイヤル温度計で入口および出口の空気温度を測定し、またケーシング内に寒暖計を挿入して空気温度を測定した。なお参考のため固定子の導体抵抗の測定も実施した。(データの整理に当っては巻線に埋込のサーチコイルの温度を基準にした)

3.2 2号変圧器

試験前変圧器温度を 70°C 程度にあげておき、負荷遮断後一次、二次ともに Bushing の頭で回路から切離し、温度の降下時を利用して、つぎの測定を実施した。

(1) $\tan \delta$ —温度特性

測定ケースは ① 一次印加、二次アース、② 二次印加、一次アース、③ 一次、二次一括印加の 3 種で、測定電圧はいずれも 11 kV である。

(2) 絶縁抵抗—温度特性

測定ケースは $\tan \delta$ の場合と同じである。測定は 1 kV および 15 kV でそれぞれ絶縁抵抗の 1 分値を測定した。

温度はサーチコイル、ダイヤル温度計および L 形寒暖計の 3 種で測定した。(データの整理に当ってはサーチコイルの温度を基準にした)

3.3 予備変圧器

試験前電熱器によってあらかじめ油温を 40°C 程度まで上げておき、主変圧器とまったく同じ測定を実施した。

温度はダイヤル温度計と寒暖計の 2 種で測定した。(データの整理に当ってはダイヤル温度計の読みを基準にした)

3.4 OCB 用套管

OCB を“開”の状態とし、各 Bushing の $\tan \delta$ および絶縁抵抗を測定した。 $\tan \delta$ は 11 kV で、絶縁抵抗 (1 分値) は 15 kV DC で測定した。温度は常温である。

3.5 PT

端子を回路から切離し、AC 11 kV で $\tan \delta$ を、また DC 1 kV および 15 kV で絶縁抵抗 1 分値を測定した。温度は常温である。

3.6 CT

AC 11 kV で $\tan \delta$ を測定し、絶縁抵抗 (1 分値) は 1, 5, 10, 15 kV で電圧特性を測定した。温度は常温である。

3.7 ケーブル

各相ごとに 10 kV で $\tan \delta$ を測定した。

3.8 仕上げ 1,500 HP 用 1,200 kW 直流発電機

発電機を電機子、界磁巻線、および補償巻線の三つに分離し、つぎの測定を実施した。温度は常温である。なお供試機は運転停止後約 1 カ月放置されていたものである。

(1) 電機子

a. $\tan \delta$

200~300 V で電圧特性を測定した。

b. 直流吸収特性

500 V DC で 10 分間の吸収特性を測定した。

c. 交流電流特性

200~300 V の電圧—電流特性を測定した。

(2) 界磁巻線

a. $\tan \delta$

50~150 V で電圧特性を測定した。

b. 直流吸収特性

500 V DC で 10 分間の吸収特性を測定した。

(3) 補極および補償巻線

a. $\tan \delta$

200~400 V で電圧特性を測定した。

b. 直流吸収特性

500 V DC で 10 分間の吸収特性を測定した。

4. 測定装置

4.1 $\tan \delta$

$\tan \delta$ の測定はすべて可搬式逆シェーリングブリッジを用いた(図 4.1 参照)。図 4.2 に測定回路を示す。

4.2 直流吸収特性、絶縁抵抗

IT 15 形直流高圧絶縁試験器(電子管メガ)を用いて測定した。この測定器は DC 15 kV まで発



図 4.1 可搬式シェーリングブリッジ
Fig. 4.1 Portable schering bridge.

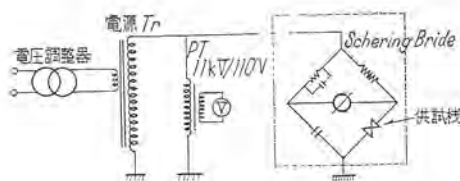


図 4.2 $\tan \delta$ 測定回路
Fig. 4.2 $\tan \delta$ measurement circuit.

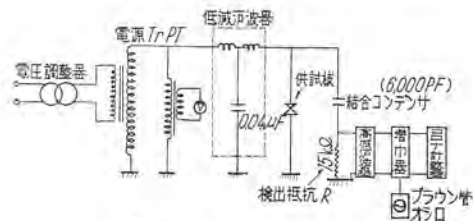


図 4.3 コロナ測定回路
Fig. 4.3 Corona measurement circuit.

生でき、かつ電圧の大きさを任意に変えることができるもので、測定に当っては印加電圧の大きさと、試料に流れる電流を読み絶縁抵抗を算出した。

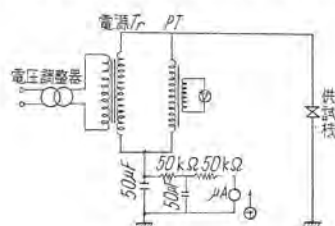


図 4.4 直流分測定回路
Fig. 4.4 D-c component measurement circuit.

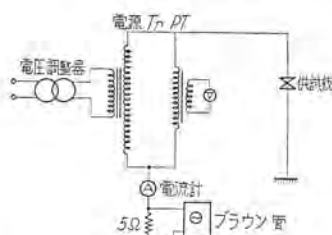


図 4.5 交流電流特性測定回路
Fig. 4.5 A-c characteristic measurement circuit.

だち図 4.3 の結合コンデンサと検出抵抗の間に波形発振器を接続し、既知の大きさの波形を印加して測定回路系全体の感度校正を行った。コロナ開始電圧は 10 MV 以上のコロナパルスが発生し始めるときの印加電圧をもってコロナ開始電圧とした。

4.4 直流分

測定回路を図 4.4 に示す。直流分の極性は図中の矢印の方向を (+) とした。なお供試機を接続しない状態で電圧をあげ、回路自体に直流分が発生しないことを確かめた後測定した。

4.5 交流電流特性

測定回路を図 4.5 に示す。

5. 測定結果

5.1 2 号主発電機

(1) 固定子

a. $\tan \delta$

測定結果を表 5.1 に示す。巻線温度はサーモカップルの読みである。

表 5.1 のデータを曲線にして図 5.1～図 5.3 に示す。

図 5.1 は各温度における三相一括の $\tan \delta$ —電圧特性、図 5.2 は 33°C で測定した各相ごとの $\tan \delta$ —電圧特性で、図 5.3 は $\tan \delta$ の温度特性である。図 5.1 および図 5.3 に点線で示した曲線は、富士鉄において経年変化をみるため $\tan \delta$ 計で測定されていたデータを付記したものである。

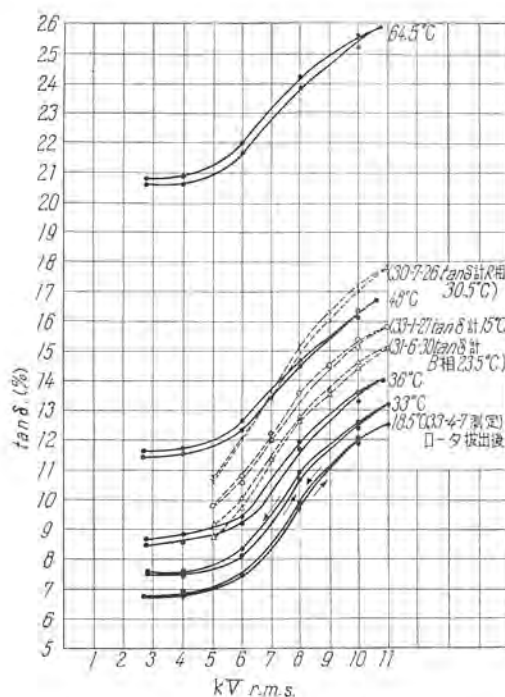


図 5.1 No. 2 Ge-固定子 $\tan \delta$ —電圧特性
Fig. 5.1 No. 2. Ge-stator $\tan \delta$ -voltage characteristic.

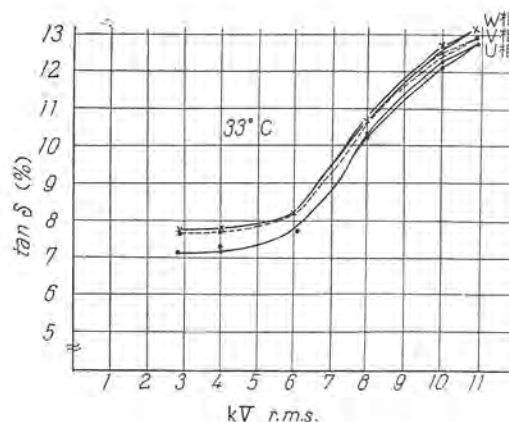


図 5.2 各相別 $\tan \delta$ —電圧特性
Fig. 5.2 $\tan \delta$ -voltage characteristic classified according to phase.

表 5.1 固定子 tan δ 室温 13~14°C

相 別	電 圧 (kV)	tan δ (%)	静電容量 (μ F)	巻線温度 (°C)	測定日時	備 考
三 相 一括	2.75	20.6	0.335	64.5	4月4日 9時8分	8時10分発 電機停止 停止時の巻線 温度 63°C
	4	20.6	0.324			
	6	21.8	0.329			
	8	23.9	0.342			
	10	25.2	0.355			
	10.75	25.9	0.361			
	10	25.6	0.447			
	8	24.2	0.343			
	6	22.0	0.334			
	4	20.9	0.329			
	2.75	20.8	0.325			
三 相 一括	2.7	11.4	0.266	48	4月4日 12時38分	
	4	11.5	0.267			
	6	12.3	0.270			
	8	14.5	0.280			
	10	16.1	0.291			
	10.65	16.7	0.295			
	10	16.3	0.292			
	8	14.7	0.280			
	6	12.6	0.271			
	4	11.7	0.268			
	2.75	11.6	0.268			
三 相 一括	2.75	8.5	0.247	36	4月4日 14時20分	
	4	8.6	0.247			
	6	9.2	0.249			
	8	11.8	0.259			
	10	13.3	0.269			
	10.8	14.0	0.274			
	10	13.6	0.271			
	8	11.9	0.259			
	6	9.4	0.250			
	4	8.8	0.249			
	2.75	8.7	0.249			
三 相 一括	2.8	7.5	0.2405	33	4月5日 9時23分	
	4	7.5	0.2405			
	6	8.1	0.240			
	8	10.7	0.2535			
	10	12.4	0.2615			
	11	13.2	0.267			
	10	12.5	0.262			
	8	10.9	0.2505			
	6	8.2	0.242			
	4	7.6	0.240			
	2.8	7.6	0.240			
U 相 (他相接地)	2.8	7.1	0.0925	33	4月5日 9時36分	
	4	7.1	0.0925			
	6	7.7	0.0933			
	8	10.3	0.0968			
	10	12.2	0.1005			
	10.85	12.8	0.1025			
	10	12.3	0.1005			
	8	10.3	0.0965			
	6	7.7	0.0933			
	4	7.2	0.0927			
	2.8	7.2	0.0927			
V 相 (他相接地)	2.8	7.6	0.0939	33	4月5日 9時45分	
	4	7.7	0.0940			
	6	8.2	0.0946			
	8	10.6	0.0978			
	10	12.3	0.1020			
	10.9	13.0	0.104			
	10	12.5	0.1015			
	8	10.6	0.0978			
	6	8.3	0.0946			
	4	7.8	0.0941			
	2.8	7.7	0.0941			
W 相 (他相接地)	2.8	7.7	0.0939	33	4月4日 9時53分	
	4	7.7	0.0939			
	6	8.3	0.0944			
	8	10.7	0.0981			
	10	12.5	0.102			
	10.9	13.2	0.1038			
	10	12.6	0.102			
	8	10.7	0.0977			
	6	8.3	0.0945			
	4	7.8	0.0940			
	2.8	7.7	0.0939			
三 相 一括	2.75	6.7	0.235	18.5	4月7日 12時35分	Rotorを抜き 出してから約 2日放置後に 測定 湿度約 35~ 60% RH
	4	6.7	0.235			
	6	7.3	0.2365			
	8	9.9	0.2450			
	10	12.0	0.256			
	10.7	12.5	0.258			
	10	12.1	0.256			
	8	9.8	0.244			
	6	7.3	0.2365			
	4	6.8	0.236			
	2.75	6.7	0.236			

表 5.2 固定子直流試験 室温 13~14°C

相 別	印加電圧 (V,DC)	時間 (分)	電流 (μ A)	絶縁抵抗 (M Ω)	成垢 指数	巻線 温度 (°C)	測定日時	備 考
三 相 一括	1,000	0.5	41	24.4	2.4	64.5	4月4日 9時35分	8時10分発 電機停止、 停止時の巻 線温度 68°C
		1	25.5	39.2				
		1.5	22	45.5				
		2	19.1	52.3				
		3	17.0	58.8				
		4	14.5	69.0				
		5	12.9	77.5				
		7	12.0	83.3				
10	10.5	95.1						
三 相 一括	1,000	0.5	24	41.7	3.6	48	4月4日 12時47分	
		1	15.7	63.7				
		1.5	12.1	82.5				
		2	10.5	95.0				
		3	8.3	120.0				
		5	6.1	164.0				
		7	5.3	188.5				
		10	4.3	232.0				
三 相 一括	1,000	0.5	23	43.5	4.2	36	4月4日 14時35分	
		1	12.2	82.0				
		1.5	10.0	100.0				
		3	6.1	163.9				
		5	4.4	244				
		7	3.4	294				
		10	2.9	345				
		三 相 一括	1,000	0.5				
1	4.9			204				
1.5	3.9			256.5				
2	3.4			294				
3	2.5			400				
5	1.7			588				
7	1.35			740				
10	1.1			910				
三 相 一括	放 電	0.5	6.5		33		4月5日 10時13分	充電時の10 分値を測定 後、1分後 に放電開始
		0.75	4.7					
		1	3.8					
		1.5	2.68					
		3	1.43					
		5	0.89					
		7	0.62					
		10	0.42					
三 相 一括	5,000	0.5	39.5	126.5	4.2	33	4月5日 10時24分	1,000 V の 放電電流の 10分値を測 定後、1分 後に充電開 始
		1	23.5	213				
		1.5	18.5	270				
		2	13.6	367				
		3	11.0	455				
		5	7.6	657				
		7	6.7	745				
		10	5.5	909				
三 相 一括	放 電	0.25	55		33		4月5日 10時35分	充電時の10 分値を測定 後、1分後 に放電開始
		0.5	32.5					
		0.75	23					
		1	18					
		1.5	13					
		2	10					
		3	6.9					
		4	5.27					
		7	2.95					
		10	1.9					
三 相 一括	10,000	1	51	196	4.1	33	4月5日 10時47分	5,000 V の 放電電流の 10分値を測 定後、1分 後に充電開 始
		1.5	35.5	282				
		2	30.5	328				
		3	22	455				
		6	15	667				
		7	14	714				
		10	12.5	800				
三 相 一括	放 電	0.5	62		33		4月5日 10時57分	充電時の10 分値を測定 後、1分後 に放電開始
		0.75	44					
		1	35					
		1.5	25.5					
		2	19.8					
		3	13.5					
		4	10.5					
		5	8.5					
		7	5.9					
		10	4.0					
三 相 一括	15,000	0.5	150	100	3.5	33	4月5日 11時8分	10,000V の 放電電流の 10分値を測 定後、1分 後に充電開 始
		1	80	187				
		1.5	61.5	244				
		2	50	300				
		3	37.5	400				
		5	30	500				
		7	26	576				
		10	22.5	665				
三 相 一括	1,000	0.5	6.9	145	4.3	18	4月7日 12時45分	Rotor抜出 後約2日放 置後に測定 放置中湿度 30~40% RH
		1	4.3	232				
		1.5	3.4	285				
		2	2.8	357				
		3	1.95	513				
		5	1.6	625				
		7	1.2	833				
		10	1.0	1,000				

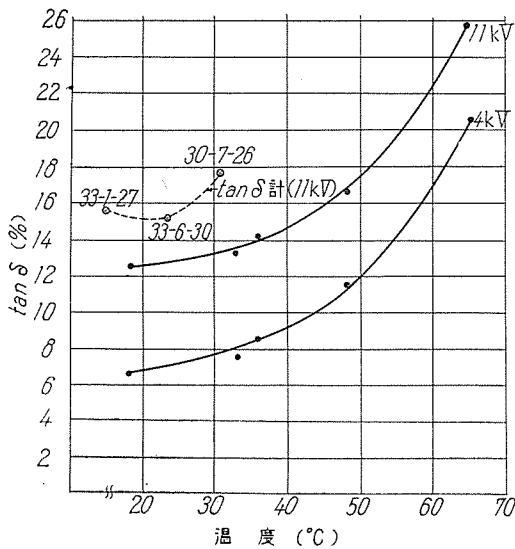


図 5.3 $\tan \delta$ -温度特性 (三相一括)

Fig. 5.3 $\tan \delta$ -temperature characteristic
3 phase en bloc.

考 察

$\tan \delta$ の電圧特性は図から明らかなとおり常規運転電圧 ($11/\sqrt{3} \text{ kV} \approx 6.35 \text{ kV}$) 以下の 5,000 V 付近から $\tan \delta$ が急増し履歴現象もかなり大きい。すなわち 5,000 V 付近からコロナが発生しており、コイル内部には相当大きなボイドが存在していることが考えられる。 $\tan \delta$ の絶体値は絶縁方式によって幾分異なるが、現在劣化判定の目安としては、定格電圧における $\tan \delta$ の値が約 10 % 以下とされている。 $\tan \delta$ の値および電圧特性の形状から判断すると、供試発電機はいわゆる“劣化”の範囲にはいる。総合考察で詳述するように、コイル内部にマイカ剥離が起っている可能性が大きい。

各相別の $\tan \delta$ は差異がなく、局部的に悪くなっている可能性はなく、全般的に悪いと判断される。

富士製鉄所有の $\tan \delta$ 計による測定値と比較すると電圧特性の形状は今回の Schering Bridge の測定データ

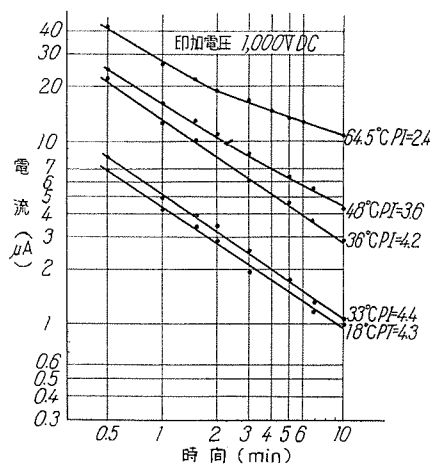


図 5.4 No. 2. Ge 固定子直流吸収特性 (三相一括)

Fig. 5.4 No. 2. Ge stator d-c absorption characteristic
(3 phase en bloc).

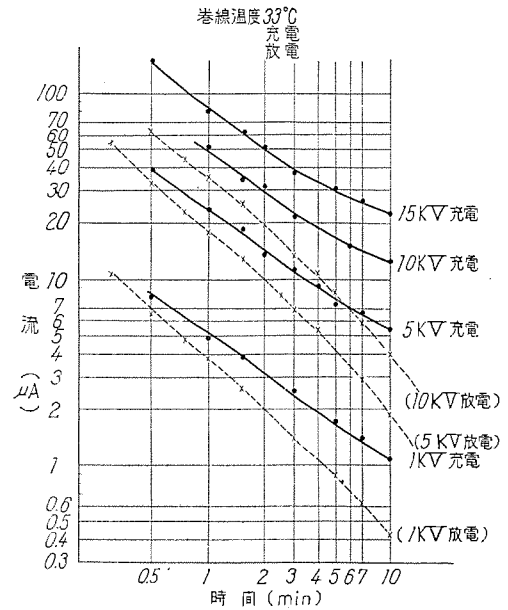


図 5.5 No. 2 Ge 直流吸収特性 (三相一括)

Fig. 5.5 Ge d-c absorption (3 phase en bloc).

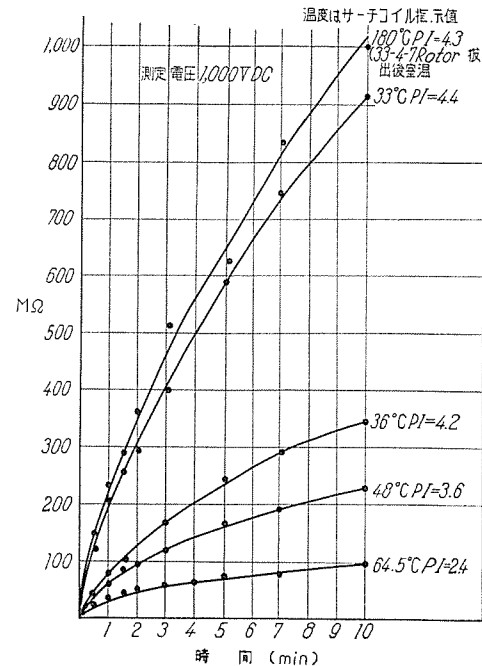


図 5.6 No. Ge 固定子直流吸収特性

Fig. 5.6 No. Ge stator d-c absorption.

とよく似ているが絶体値が約 2% 高目にでているようであり、機会を見て $\tan \delta$ 計の較正を実施されることを希望する。

b. 直流吸収特性

c. 絶縁抵抗-温度特性

d. 絶縁抵抗-電圧特性

測定結果を表 5.2 に示す。巻線温度はサーチコイルの読みである。

表 5.2 の結果を曲線にして図 5.4～図 5.8 に示す。

図 5.4 および図 5.5 は直流吸収特性を時間—電流特性として表示したもので、図 5.4 は温度もパラメータとし

た場合で、図5.5は印加電圧を変えた場合である。電圧特性は1kV、5kV、10kV および 15kV で測定したが、測定に当っては1kV で10分間の吸収特性を測定後、10分間の放電電流を測定し、引続いて5kV で10分間の吸収特性を測定した。このように充電時と放電時の特性を10分ずつ測定しながら電圧をあげたが、5kV、10kV および 15kV の充電時の電流の読みは、それぞれ1kV、5kV および 10kV における残留電荷による電流を含んだ値である。この残留による影響を補正するためにはたとえば5kV における放電電流を20分まで曲線上で外挿し、各時間における充電電流の値を、つぎの10kV における各時間における充電電流の読みに加算すればよいが、表5.2あるいは図5.5より一見明らかなように、前の電圧印加による残留電荷による10分目以降の放電電流の値はつぎの電圧印加時の充電時の電流にくらべ非常に小さく、直流吸収特性に大した影響を与えていないので、データの整理に当っては測定値をそのまま採用した。

図5.6は各温度における1,000V で測定した直流吸収特性を絶縁抵抗—時間特性として表示したもので、図5.7は絶縁抵抗(10分値)の電圧特性、図5.8は絶縁抵抗の温度特性である。

考 察

成極指数の値は常温付近では4以上、65°C程度で2.4

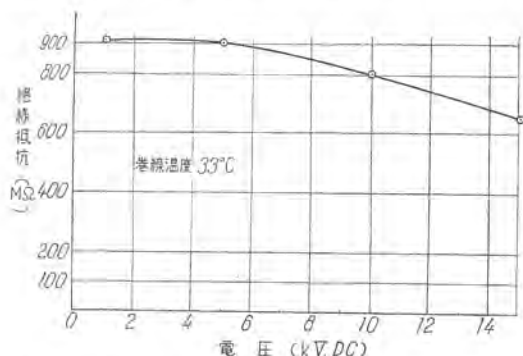


図 5.7 No. 2 Ge 固定子絶縁抵抗—電圧特性 (三相一括)
Fig. 5.7 No. 2 Ge stator insulation resistance—voltage characteristic (3 phase en bloc).

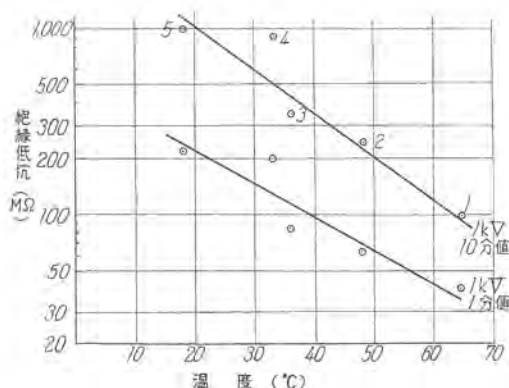


図 5.8 絶縁抵抗—温度特性 (三相一括)
Fig. 5.8 Insulation resistance—temperature characteristic (3 phase en bloc).

で、現在吸湿の目安として一般に用いられている判定基準(常温において2.5以上を乾燥、1.5以下を吸湿としている)からすればコイルは十分乾燥状態におかれており、Rotorを抜き出してから2日後に測定した成極指数も4.3で、放置中に吸湿した現象は認められない。(もっともこの間の大気湿度は30~40% PHで非常に乾燥している)

図5.7の絶縁抵抗電圧特性からわかるとおり、絶縁抵抗は5kV付近から幾分垂下特性を示しているが、曲線の形状から判断すると破壊電圧はおそらく20kV以上あるものと判断される。

図5.8の温度特性で33°Cにおける測定値が曲線からひどくはずれているが、これはサーチコイルの指示値に問題があるのではないかと考えられる。絶縁抵抗は温度に対して

$$\log R_2 = \log R_1 - \frac{t_2 - t_1}{N} \quad (4.1)$$

R_2 温度 t_2 における絶縁抵抗

R_1 温度 t_1 における絶縁抵抗

N 温度系数

で表わせることは衆知であるが、従来の経験によると高圧発電機巻線の N は40~60で、図5.8の曲線では $N=45$ となり正常である。

e. コロナ特性

表 5.3 No. 2 Ge 固定子コロナ開始電圧

相 別	コロナ開始電圧 (kV, rms)	巻線温度	測定日時
U 相	4.7	33°C	4月5日
V 相	5.4	33	4月5日
W 相	5.3	33	4月5日

各相ごとに測定したコロナ開始電圧は表5.3のとおりで、印加電圧に対するコロナパルス大きさとパルス数の関係を図5.9~図5.11に示す。

考 察

図5.9~図5.11で横軸に示す区分値とは、巻線中に発生しているコロナパルスの大きさを示す値で、縦軸のパルス数は、横軸に示す区分値以上の大きさのパルス発生数である。たとえばU相において印加電圧6kVのときは20MV以上のコロナパルスは200個/sec発生していることを示す。

コロナ開始電圧は運転常規電圧(約6.35kV)以下で運転中においてすでにコロナが発生している。この値は図5.1で $\tan \delta$ が急増する値、および後述の直流分の急変する値と比較的よく合っている。

コロナパルスは印加電圧6kVでは20~30mV以上のコロナは発生していないが、8kVになるとコロナの発生数は急激に増加し、10kV付近では100mWにもおよぶ大きさのコロナが発生しており、コイル内部に6kV程度で放電を起す大きさのボイドが非常に沢山存在しており、さらにこれ以上の大きなボイドもあることが考えられる。現在のコロナ測定技術では内部ボイドによ

るコロナ放電と、コイル表面の表面コロナとは分離できないが、他の測定結果や点検結果とも合わせ考えると、測定値は大部分が内部コロナであると考えるのが至当であろう。各相別に大した相違はないが、U相が他の相にくらべコロナ開始電圧も幾分低く、6 kV におけるパルス数も多い。10 kV 付近におけるパルス数は大差がない。

f. 直流分特性

直流分の測定結果を表 5.4 に示す。

表 5.4 直流分 巻線温度 33°C
測定日時 4 月 5 日 14 時 30 分

印加電圧 (kV)	直 流 分 (μA)			備 考
	U 相	V 相	W 相	
2.75(*)	+0.05	0	0	極性は図 4 の電流計の接地側から変圧器に向う方向を(+)とする。
3	+0.05	0	0	
4	+0.06	0	0	
5	+0.10	+0.01	+0.01	
6	+0.21	+0.11	+0.11	
7	+0.27	+0.21	+0.16	
8	+0.28	+0.21	+0.17	
9	+0.28	+0.21	+0.18	
10	+0.26	+0.21	+0.19	
10.8(**)	+0.16	+0.21	+0.22	
10	+0.10	+0.11	+0.07	
9	+0.04	+0.06	0	
8	0	+0.02	-0.05	
7	-0.04	0	-0.09	
6	-0.02	0	-0.09	
5	-0.02	0	-0.06	
4	-0.01	0	-0.05	
3	-0.01	0	-0.01	
2.75(*)	0	0	0.01	

注: * V 相では 2.8 kV ** W 相では 11 kV

考 察

表 5.4 の測定結果を曲線にして図 5.12 に示す。直流分の表われる原因としてはまだ明らかにされていない面もあるが、主として非対称電極の放電や、コロナ放電の非対称性による整流特性、電解起電力などがその主なものとされており、発電機巻線ではコロナ放電に起因するものがもっとも多いようである。良好な発電機では定格電圧付近まで直流分はたいして現われず、電圧の上昇、

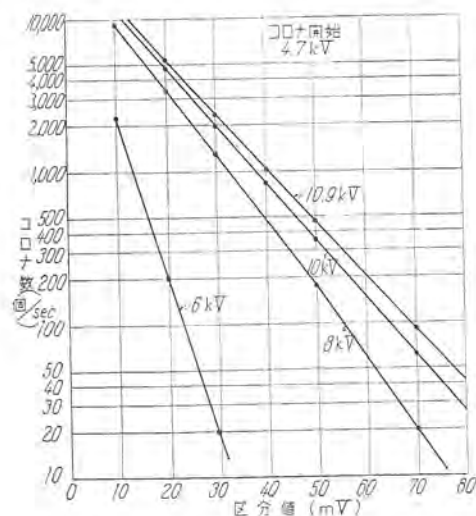


図 5.9 No. 2 Ge 固定子 U 相コロナ特性
Fig. 5.9 No. 2. Ge stator U phase corona characteristic.

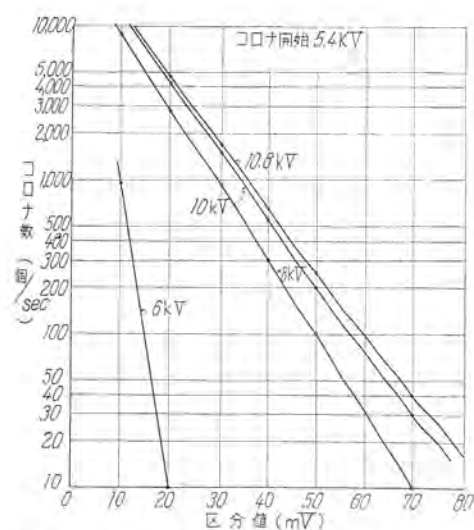


図 5.10 No. 2. Ge 固定子 V 相コロナ特性
Fig. 5.10 No. 2. Ge stator V phase corona characteristic.

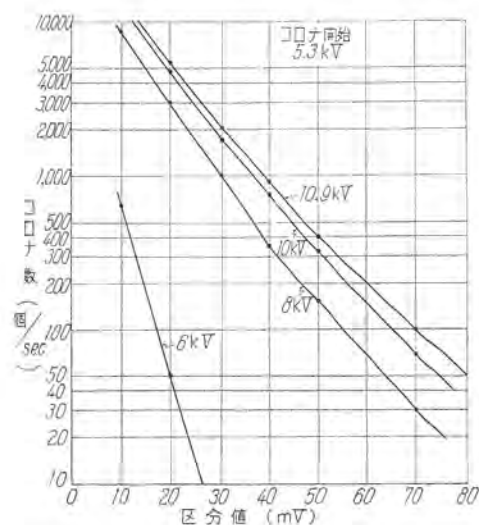


図 5.11 No. 2. Ge 固定子 W 相コロナ特性
Fig. 5.11 No. 2. Ge stator W phase corona characteristic.

下降による履歴現象も少ない。図 5.12 から明らかなとおり直流分は各相とも 4~5 kV で急変しており（この値はコロナ開始電圧とよく合う）電圧を下げた場合の履歴現象も大きく、 $\tan \delta$ およびコロナ特性で述べたとおりコイル内部に多くのボイドが存在していることを示している。

g. 交流電流特性

1. 電圧—電流特性

測定結果を表 5.5 に示し、これを曲線にしたものを図 5.13 に示す。電流増加率 Δ の算出はつぎに示す式 (4.2) による。

$$\Delta = \frac{I - I_0}{I} \times 100 (\%) \quad \dots \dots \dots (4.2)$$

I : 定格電圧 (11 kV) における電流

I_0 : 電流が電圧に比例して増加すると見なしたときの定格電圧における電流

表 5.5 交流電圧—電流特性 巻線温度 33°C

測定日時 4月5日 15時30分

電圧 (kV)	電 流 (mA)			電流増加率 (%)		
	U 相	V 相	W 相	U 相	V 相	W 相
2.75	87	89	87			
3	94	96	96			
4	127	128	128			
5	158	160	160			
6	189	192	183			
7	225	228	227			
8	262	264	266			
9	302	305	304			
10	340	343	344			
10.85	375	377	374	9.5	8.8	8.6

考 察

図 5.13 で明らかなように約 6 kV までは電流は電圧に比例して増加しているが、それ以上の電圧で電流は直線からずれて増加している。このように電流が増加するのは、コイル内部にボイド放電が起り、見掛け上の静電容量が増加することに起因するのがもっとも多い。電流増加率 Δ はこの電流増加の割合を示すもので、良好な巻線では定格電圧における Δ が数%以内であるが、供試機は各相とも Δ がほぼ 10% に近く、 $\tan \delta$ および直流分などで述べたとおりコイル内部にボイドの多いことを示している。

2. 電圧—電流波形特性

電圧—電流波形特性を測定し、電流波形の変歪度から劣化を判定する方法があるが供試機を接続しない無負荷時の電流波形が図 5.14 のように非常に高次の高調波を含んだひずみ波形であり、供試機を接続したときの電流

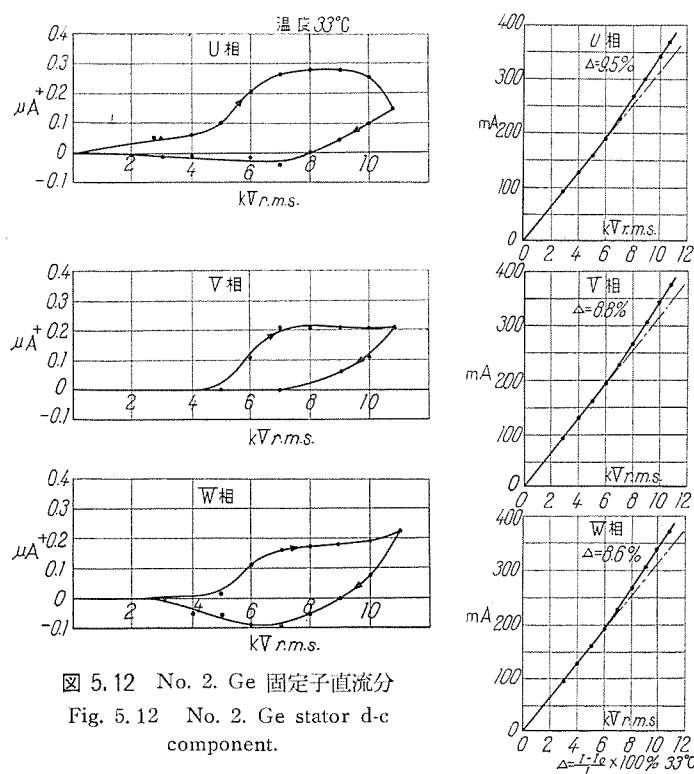


図 5.12 No. 2. Ge 固定子直流分

Fig. 5.12 No. 2. Ge stator d-c component.

図 5.13 No. 2. Ge 固定子交流電圧—電流特性
Fig. 5.13 No. 2. Ge stator a-c voltage-current characteristic.

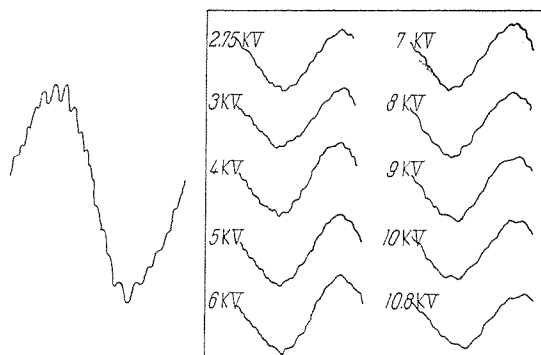


図 5.14 無負荷時の電流波形

Fig. 5.14 Waveform of no-loaded.

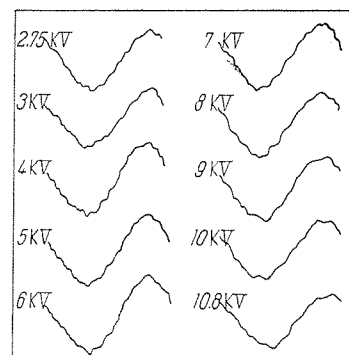


図 5.15 W 相電流波形

Fig. 5.15 W phase current waveforms.

波形の変歪を測定することができなかった。一応参考までに W 相について測定した電流波形を図 5.15 に示す。

(2) 回転子

a. $\tan \delta$

測定結果を表 5.6 に示す。

図 5.16 はこれを曲線にしたものである。

表 5.6 回転子 $\tan \delta$

番号	電 圧 (V. rms)	$\tan \delta$ (%)	静電容量 (μF)	温 度 ($^{\circ}C$)	測定日時	備 考
1	100	10.6	0.2905	21.5	4月5日 10時30分	Rotor 抜き出し 前
	157	18.1	0.2975			
	208	24.3	0.2095			
	160	19.4	0.2995			
	100	14.6	0.2940			
2	99	15.9	0.2920	18.5	4月7日 10時38分	Rotor を抜き出 してから2日放置 後測定 放置中湿度 30~40% RH
	160	21.0	0.2965			
	204	25.5	0.2040			
	160	20.5	0.2965			
	102	16.2	0.2965			
3	107	8.5	0.286	16	4月8日 16時40分	Rotor を掃除後 に測定
	148	11.2	0.286			
	200	17.2	0.291			
	148	16.1	0.289			
	107	12.4	0.288			

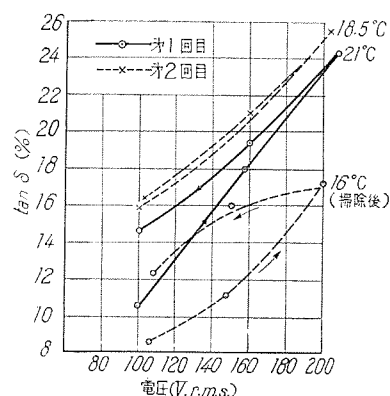


図 5.16 No. 2. Ge 回転子 $\tan \delta$ 電圧特性

Fig. 5.16 No. 2. Ge stator $\tan \delta$ -voltage characteristic.

考 察

$\tan \delta$ の電圧特性は図からわかるとおり非常に悪く、絶体値も非常に大きく、絶縁特性はきわめて悪い。

回転子を抜き出してから測定した値が、測定温度が低いのかかわらずかえって $\tan \delta$ が高くなっており、また掃除後の $\tan \delta$ 曲線の loop がかえって大きくなっているなどの現象から考えると絶縁物が、その表面状態によって支配されやすい状態にあるものと思われる。

b. 絶縁抵抗—電圧特性

c. 絶縁抵抗—温度特性

測定結果を表 5.7 に示す。

考 察

絶縁抵抗の値は 100V DC で 0.15 M Ω 程度、運転電圧の 220 V では 0.1 M Ω 以下できわめて悪い。表 5.7 の結果を曲線にし絶縁抵抗の電圧特性を図 5.17 に、また 100 V における絶縁抵抗の温度特性を図 5.18 に示す。巻線温度は casing の内部温度（吸気温度と排気温度の平均）をとったので温度特性は正確ではないが、固定子の絶縁抵抗の項に示した式 (1) のような特性をぜんぜん示さず、測定値は絶縁物としての特性ではなく、きわめて漏洩分の多い局所的な欠陥、あるいは全般的な塵埃などによる汚損にもとづく結果を指示しているものとしたか

表 5.7 回 転 子 絶 縁 抵 抗

番号	印加電圧 (V, DC)	時間 (分)	電 流 (μ A)	絶縁抵抗 (M Ω)	成極 指数	巻線 温度 ($^{\circ}$ C)	測定日時	備 考
1	100	0.5	640	0.156	1	44.5	4月4日	巻線温度は吸気温度と排気温度の平均をとった。 4月7日の測定は室温である。
	100	0	640	0.156			10時45分	
	200	1	1,910	0.105				
2	100	0.5	698	0.146	1	32	4月4日	
	100	1	698	0.146			12時31分	
	170	1	1,880	0.091				
3	100	0.5	710	0.141	1	26	4月4日	
	100	1	708	0.142			15時5分	
	160	1	1,844	0.054				
4	100	0.5	1,160	0.086	1	21.5	4月5日	
	100	1	1,154	0.087			11時5分	
	100	1.5	1,150	0.087				
	100	2	1,150	0.087				
	140	1	1,786	0.078				
5	100	0.5	1,380	0.073	1	18.5	4月7日	Rotor を抜き出してから 2日後に測定
	100	1	1,380	0.073			11時5分	
	120	1	1,632	0.074				
6	100	0.5	780	0.128	1	16	4月8日	Rotor を掃除してから測定
	100	1	780	0.128			16時40分	
	170	0.5	1,824	0.093				
	170	1	1,824	0.093				

考えられない。このように絶縁抵抗の値が異常に低く、また温度特性が正常でない原因は後述の点検結果に述べるとおり、コイル表面に導電性の塵埃が付着しているためであると考えられる。掃除後の絶縁抵抗も良くなっていない。

(3) 主励磁機

a. $\tan \delta$

b. 直流吸収特性

c. 絶縁抵抗—電圧特性

測定結果を表 5.8, 5.9 に示し、これを曲線にして図 5.19 および図 5.20 に示す。

考 察

富士製鉄室蘭製鉄所における絶縁試験・中野・永井・中村・山田・西村・大町・米野・原・川上・影山

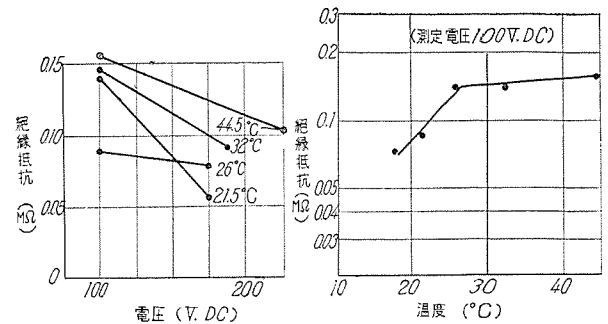


図 5.17 回転子絶縁抵抗—電圧特性
Fig. 5.17 Rotor insulation resistance—voltage characteristic.

図 5.18 回転子絶縁抵抗—温度特性

Fig. 5.18 Rotor insulation resistance—temperature characteristic.

表 5.8 主 励 磁 機 $\tan \delta$

電 圧 (V, AC)	$\tan \delta$ (%)	静電容量 (μ F)	温 度 ($^{\circ}$ C)	測 定 日 時
200	2.3	0.0161	20.5	4月5日 10時45分

表 5.9 主 励 磁 直 流 試 験

印加電圧 (V, AC)	時 間 (分)	電 流 (μ A)	絶縁抵抗 (M Ω)	成極指数	温 度 ($^{\circ}$ C)	測定日時
500	0.5	0.12	4,160	2.5	20.5	4月5日 11時20分
	1	0.1	5,000			
	1.5	0.08	6,250			
	2	0.07	7,140			
	4	0.06	8,330			
	5	0.05	10,000			
	7	0.05	10,000			
	9	0.04	12,500			
	10	0.04	12,500			
1,000	10	0.10	10,000			
1,000	10	0.28	7,150			

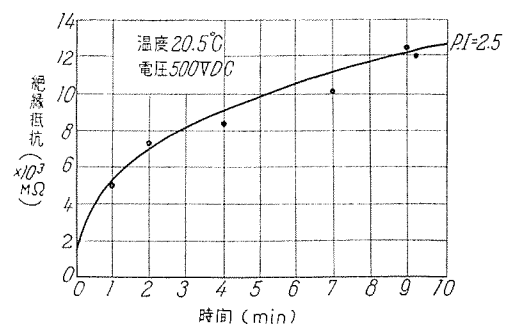


図 5.19 No. 2. Ge 主励磁機直流吸収特性

Fig. 5.19 No. 2. Ge main exciter d-c absorption characteristic.

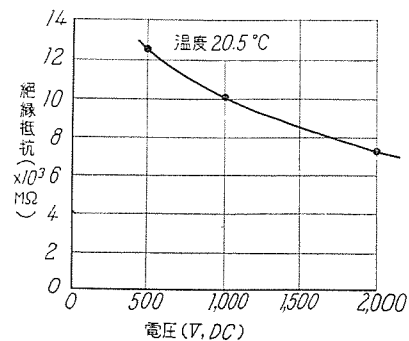


図 5.20 No. 2. Ge 主励磁機絶縁抵抗—電圧特性

Fig. 5.20 No. 2. Ge Main exciter insulation resistance—voltage characteristic.

表 5.10 回転子不良点検出結果

測定日	ナイフエッジの位置 (%)	電流 (mA)	備考
4月7日、回転子を固定子から引出した後に測定	0	+5.5	温度 20°C Meg. 0.1 MΩ
	10	5.0	
	20	4.0	
	30	3.5	
	40	2.8	
	50	2.0	
	60	1.5	
	70	1.0	
	80	0.3	
	90	-0.1	
	100	-0.9	
4月9日、回転子コイルを掃除後測定	0	+0.5	温度 18°C
	10	0.4	
	20	0.35	
	30	0.3	
	40	0.25	
	50	0.2	
	60	0.15	
	70	0.1	
	80	0	
	90	-0.15	
	100	-0.3	

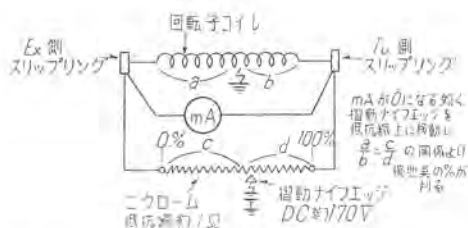


図 5.21 回転子コイル絶縁不良箇所測定回路
Fig. 5.21 Measuring circuit of rotor faulty point.

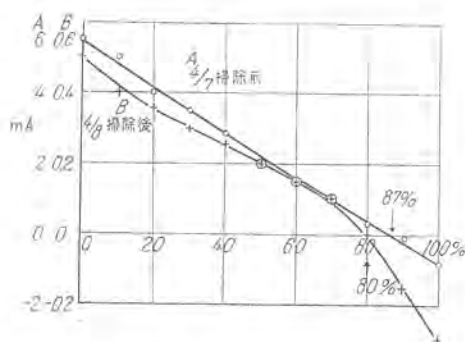


図 5.22 回転子不良箇所
Fig. 5.22 Rotor faulty points.

成極指数は 2.5 で良好であり、絶縁抵抗の値も十分である。絶縁抵抗の電圧特性は電圧とともに幾分低下しているが、定格電圧 (220 V) よりはるかに高い 2,000 V においても急激な低下は認められず、絶縁物は良好な状態にある。

(4) 回転子コイル絶縁不良点検出測定

(2) 項で述べたとおり、回転子の絶縁抵抗がきわめて悪いのでその不良箇所を検出するためにつぎの要領で測定を行った。すなわち図 5.21 のように Bridge

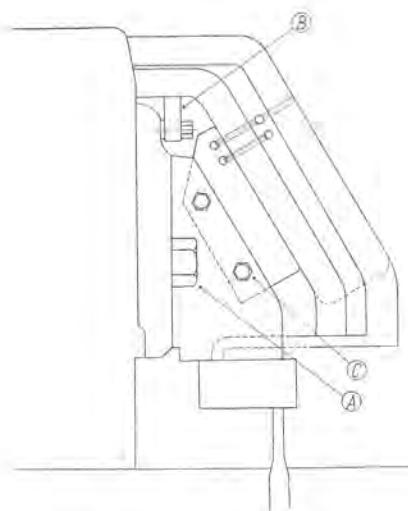


図 5.23 固定子端部
Fig. 5.23 Stator terminal.

Method にて接地がある特定の 1 点かまたは全般的に不良かを判定するために測定を行った結果は図 5.10 のとおりである。

表 5.10 の結果を図 5.22 に示す。

考察

4 月 7 日の測定では 87% 点に接地があるように推定されるが掃除後の測定では 80% 点に移動し、かつ電圧分布も図 5.22 のように変り直線でない。

吸湿や掃除により見掛けの接地点が異動することおよび電圧分布が非直線である点より考えて経験によりこの回転子コイルの絶縁不良はある特定の点で接地しているのではなく、全般的に塵埃により不良になっているもので一番弱点は 80% すなわち全コイル 14 ターンのうちのタービン側スリップリングに接続された #2~#3 コイル付近であるといえる。

このような状態の回転子は保持環を取除いて #2~#3 コイルを切離し、または掃除や絶縁更新をしてさらに上記の試験を繰り返せば見掛けの接地点は他に異動するのが通例である。

したがってこのコイル絶縁不良の原因は上記測定と外観の塵埃の状況から判断して次項のような成分の塵埃によりコイル全般にわたり絶縁が低下しているものと考えられる。

(5) 機器に付着していた塵埃の分析

絶縁の良否は付着している塵埃の成分と量、付着場所に関係するがその成分を分析した結果は表 5.11 のとおりである。

表 5.11 塵埃の分析

試料採取場所	C (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	NaCl (%)	100°~105° 減量(水分) (%)
回転子エンドコイル	22.17	20.24	25.60	2.22	0.85
集電環	29.21	19.25	19.60	2.81	0.90
主電動機	25.60	21.29	21.20	2.51	0.80

注：この分析は室蘭製鉄所検定課の 4 月 12 日付分析報告書による。

考 察

成分中 C, Fe とともに漏洩回路を作り絶縁抵抗を低下させるが NaCl は湿度が上昇すると吸湿潮解し絶縁をはなはだしく低下させる。すなわち乾燥, 吸湿状態によりメグが大巾に変化する性質を有す。

(6) 外部点検

外部点検はタービン発電機定期修理における点検要領により逐一行った。

発見した修理を要する点はつぎのとおりである。

a. 固定子関係

1. 鉄心締付ボルトのナット (図 5.23 ㉔) でゆるんだものが 5~6 本ある。

原因 コア一積層間に挿入してある絶縁機の枯れによる。

対策 ナットを増締すればよい。増締はボルトナットの曲り止めポンチを小タガネにてハツリ取り締付トルク 120 m/kg にて締付け後、回り止めポンチを打てばよい。

2. エンドコイル部のマイカルタ製歯形挿え (図 5.23 ㉕) およびマイカルタ製エンドコイル支え (図 5.23 ㉖) はともに枯れを生じ締付ボルトがゆるんでいる。

原因 マイカルタの経年の枯れである。

対策 増締すればよい。

3. コイル直線部のマイカルタ製クサビが甘くなってゆるんでいるもの数個所あり。

原因 これも経年のマイカルタの枯れとコイルの絶縁の枯れとによってクサビが甘くなった。

対策 鉄心中央部は鉄心の通風ダクトとクサビの切りかけがほぼ一致して移動しているものはないから、鉄心の両端のクサビが移動しないよう保修し運転中振動や風圧のため鉄心から抜き出るのを防ぐ。

保修の方法は現物合わせでフィッシュ紙のようなファイラを甘いクサビの下に挿入しクサビを固く打込めばよい。

なおワニス W #28 をファイラの両面クサビの内面に塗布してクサビを打込めば脱出防止に役立つ。

4. 鉄心背面に赤さびがでている。背面は鉄心の下部しか点検できなかった。

原因 長期停止の時期は気温の低下により水滴が凝着したものと考えられる。

対策 ワイヤブラシなどで鉄心エアダクトにさびがはいらぬよう注意してさび落しを行いワニス W #28 を塗布する。

5. その他エンドコイル部の変形もなく間隔片やコイルの締付ひものゆるみや切断された所もない良好な状態である。

エンドコイル部の塵埃をボロとブラシで掃除しキハツ油をボロに浸し表面を掃く程度でよい。

b. 回転子関係

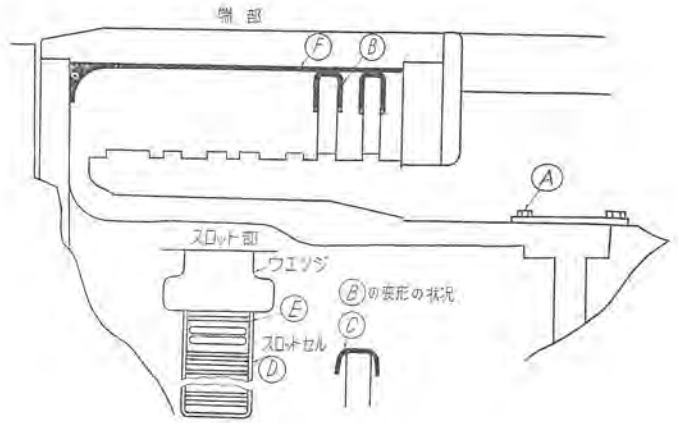


図 5.24 回転子の絶縁

Fig. 5.24 Rotor insulation.

1. 回転子リードの軸貫通部よりの立上がりリードの鉄製おおい (図 5.24 ㉗) の締付ボルトがゆるんでいる。

原因 絶縁抵抗低下の点検のためこのおおいを取りはずし点検後の締付および回り止め不十分と思われる。

対策 舌付ワッシャを入れて増締回り止めをする。

2. コイルのクサビが少し甘くなったものが打音により感じられたものが数個ある。

原因 コイルのクサビ下の絶縁物の経年の枯れと考えられる。

対策 今すぐ危険というほどではないが絶縁劣化の程度を参酌して適当な時期にコイル巻替えを要す。

3. エンドコイル最上部のマイカルタ製溝形絶縁物 (図 5.24 ㉘) の変形したものが十数個ある (図 5.24 ㉙)。

原因 マイカルタの経年による変形である。

対策 変形していても、通風を多少害する程度で今すぐ性能を左右するものではないが、巻替えの時期に更新する。

4. エンドコイル部の塵埃は前述のごとく炭素、鉄、塩分、水分など絶縁に好ましくないものを多く含有している。

その量もはなはだしいところは 5 mm 以上も堆積している。

原因 一度浸入したら掃除除去しにくい所である。18 年間の集積ともいえるがこの機は空気冷却器を基礎内に入れた閉鎖循環通風方式で外気と遮断されている。したがって塵埃は機内に浸入しないはずであるが、空気扉、空気冷却器、端囲い、台板などと基礎の間に隙ができがちであり、また端囲いと軸貫通部のエアシールドの隙の過大な所でとくにファンの吸気側の大気より負圧力のところから塵埃を含んだ外気を吸入し、永年の間に堆積したものである。

対策 エンドコイル部の塵埃の完全な掃除は保持環をはずさないと不可能であるが、つぎの方法で掃除したがよい。

保持環と軸との隙より裏面に付着した塵埃の層を木ヘラとハケでできるだけ掃除し、ドレーンを抜いた圧縮空

気で、ロータ胴体のエアータンク保持環の通風穴、保持環と軸との隙より繰り返し塵埃を吹飛ばし、また回転子を回しながら同様何回も繰り返し塵埃が出なくなるまで行う。

エンドコイルの導体の層間のマイカ絶縁は銅帯にはさんであるだけの個所があるから (Top Turn と Bottom Turn はテーピングしてある) あまり強い空気を吹き付けるとこのマイカが剥離する恐れがある。

いずれにしても完全な掃除は望めないから適当な時期に工場へ持込み掃除を必要とする。

また原因の項に記載した通風路の気密を修理する。

5. その他回転子胴体と保持環のかん合部分の移動や異状はない。

ジャーナル部は多少ピッチングの跡はあるが長期停止時のさびによるものと判断した問題になるような傷ではないが念のため組立時軸受の絶縁を良くしてメガで計測し記録しておくべきである。

(7) 発電機固定子温度

4月4日8時発電機を停止してから4月5日16時までの固定子温度の変化を図5.25に示す。サーチコイルの

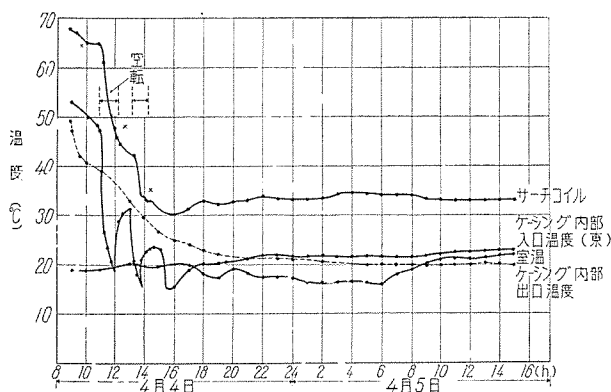


図 5.25 No. 2 主発電機固定子温度

Fig. 5.25 Temperature of No. 2. main generator stator.

表 5.12 No. 2 主変圧器 $\tan \delta$

測定ケース	印加電圧 (kV)	$\tan \delta$ (%)	静電容量 (μF)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	測定日時	備考
P-SE	10	4.22	0.0416	71.5	4月4日	温度はサーチコイルの温度をとった。
S-PE	"	3.7	0.0300		10時26分	
PS-E	"	4.9	0.0226			
P-SE	10	2.12	0.0396	47	4月4日	
S-PE	"	1.98	0.0288		14時30分	
PS-E	"	2.46	0.0214			
P-SE	2	1.1	0.0396	24.5	4月5日 15時0分	
	4	1.1	0.0395			
	6	1.1	0.0395			
	8	1.1	0.0395			
	10	1.1	0.0396			
S-PE	2	1.18	0.0287			
	4	1.18	0.0287			
	6	1.17	0.0287			
	8	1.17	0.0287			
	10	1.17	0.0287			
PS-E	2	1.11	0.0213	24.5		
	4	1.11	0.0213			
	6	1.12	0.0213			
	8	1.12	0.0213			
	10	1.12	0.0213			

温度は6点の読みの平均値である。

5.2 2号主変圧器

(1) $\tan \delta$

測定結果を表5.12に示し、これを曲線にして図5.26および図5.27に示す。

図5.26には現在変圧器の劣化判定の目安として一般的に用いられている Gross の判定曲線 (A 曲線より上は不良, B 曲線より下は良好) を付記してあるが、測定値はいずれも良好な範囲にあり、 $\tan \delta$ の電圧特性も図5.27のとおり flat で絶縁は良好である。図5.26および図5.27には富士製鉄で測定された $\tan \delta$ 計による測定値を付記してあるが、発電機の場合と同様、 $\tan \delta$ 計の指示は Schering Bridge にくらべて約 1% 以上高い。

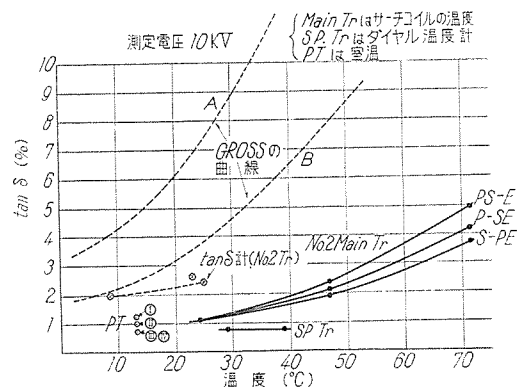


図 5.26 変圧器 $\tan \delta$ —温度特性

Fig. 5.26 Transformer $\tan \delta$ —temperature characteristic.

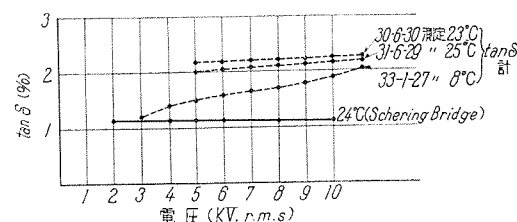


図 5.27 No. 2. 主変圧器 $\tan \delta$ —電圧特性

Fig. 5.27 No. 2. main transformer $\tan \delta$ —voltage characteristic.

(2) 絶縁抵抗

測定結果を表5.13に示し、これを曲線にして図5.28に示す。

絶縁抵抗の値はいずれも1分値である。

絶縁抵抗の値は普通で、温度特性曲線も正常である。15 kV の測定値が 1 kV の値より高いのは、普通油浸紙の電圧—電流特性が図5.29の A 曲線のようになり、したがって絶縁抵抗が B 曲線のようになるため、絶縁油が悪い場合には、絶縁抵抗が電圧とともに一度上昇する傾向がなくなる。

(3) 変圧器温度

変圧器を4月4日8時運転停止してから4月5日15時までの変圧器温度を図5.30に示す。

表 5.13 No. 2 主変圧器絶縁抵抗

測定ケース	印加電圧 (kV, DC)	絶縁抵抗 (MΩ)	温度 (°C)	測定日時	備 考
P-SE	1	3.02	71	4月4日	温度はサーコ イルの読み。
S-PE	"	3.68		10時30分	
PS-E	"	5.97			
P-SE	1	34.5	45	4月4日	
S-PE	"	41.2		15時2分	
PS-E	"	40.7			
P-SE	1	124	24.6	4月5日	15時26分
"	15	231			
S-PE	1	161			
"	15	231			
PS-E	1	192.5			
"	15	269			

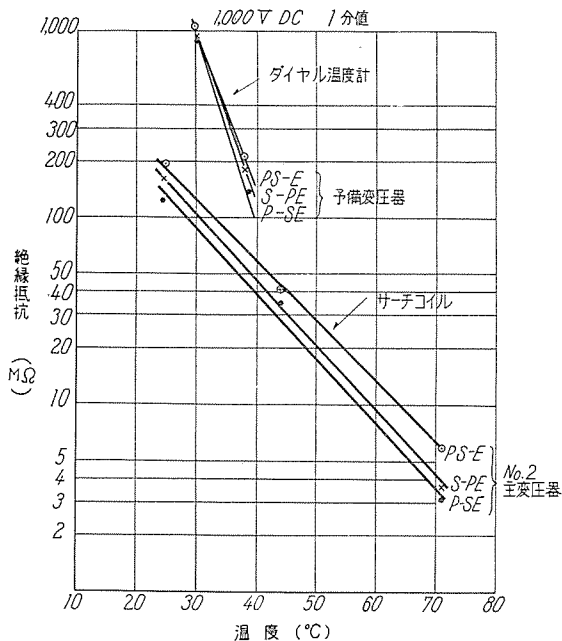


図 5.28 変圧器絶縁抵抗—温度特性

Fig. 5.28 Transformer insulation resistance—temperature characteristic.

表 5.14 予備変圧器 $\tan \delta$

測定 ケース	印加電圧 (kV)	$\tan \delta$ (%)	静電容量 (μF)	温度 (°C)	測定日時	備 考
P-SE	10	0.72	0.0387	39	4月6日	温度はダイヤ ル温度計の読 み。
S-PE	"	0.73	0.0282		9時20分	
PS-E	"	0.63	0.0204			
P-SE	10	0.79	0.0385	30	4月7日	
S-PE	"	0.80	0.0280		8時53分	
PS-E	"	0.72	0.0202			

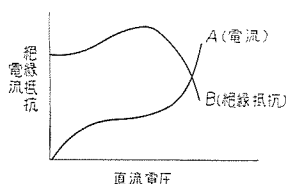
図 5.29 油浸紙の電流電
圧特性Fig. 5.29 Current vol-
tage characteristic of
oil impregnated pa-
per.

表 5.15 予備変圧器絶縁抵抗 (1 分値)

測定ケース	印加電圧 (kV, DC)	絶縁抵抗 (MΩ)	温度 (°C)	測定日時	備 考
P-SE	1	139	38.5	4月6日	温度はダイヤル 温度計読み。
"	15	339			
S-PE	1	185			
"	15	405			
PS-E	1	207	30	4月7日	
"	15	435			
P SE	1	910			
"	15	5,000			
S-PE	1	952	30	4月7日	
"	15	4,050			
PS-E	1	1,000			
"	15	3,060			

5.3 予備変圧器

(1) $\tan \delta$

測定結果を表 5.14 に示す。曲線にしたものを図 5.26 に示す。

図 5.26 より明らかなとおり絶縁状態は良好である。

(2) 絶縁抵抗

測定結果を表 5.15 および図 5.28 に示す。

図 5.28 で明らかなとおり絶縁抵抗も主変圧器より良好であるが、温度特性の傾斜が非常に大きい。油浸紙では絶縁抵抗が 1/10 になる温度差は普通 20~30°C であるが、予備変圧器ではこの値が約 10°C しかない。これはおそらく温度を変えるために実負荷でなく絶縁油を

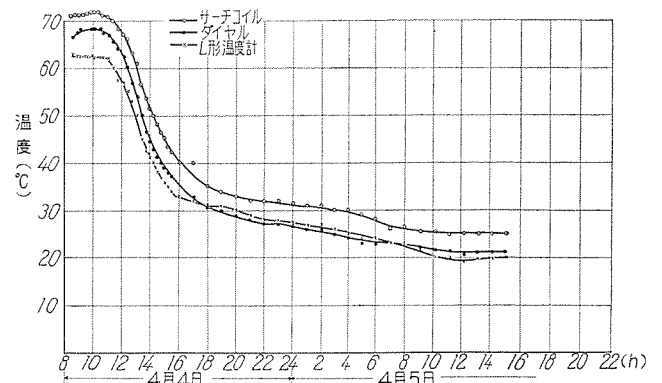


図 5.30 No. 2. 主変圧器の温度

Fig. 5.30 Temperature of No. 2. main transformer.

heater で加熱したので、ダイヤル温度計でよんだ油温と変圧器自身の温度との間にかかなり大きな相違があるためであろうと考えられる。

(3) 温度

図 5.31 に 4 月 6 日 9 時から 4 月 7 日 10 時までの予備変圧器の油温を示す。

5.4 OCB 用套管

$\tan \delta$ および絶縁抵抗の測定結果を表 5.16 に示す。 $\tan \delta$ の測定電圧は 11 kV の値で、絶縁抵抗は 15 kV DC 1 分値である。なお $\tan \delta$ の電圧特性は 11 kV まではほとんど flat であった。

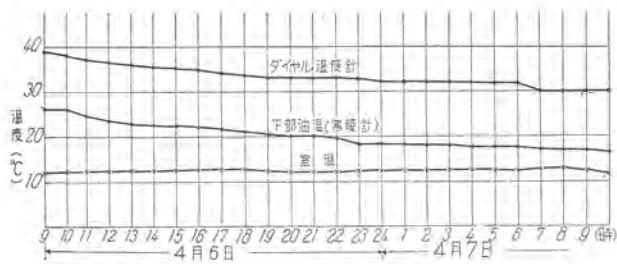


図 5.31 予備 Tr 温度

Fig. 5.31 Temperature of spare transformer.

表 5.16 OCB 套管 $\tan \delta$ および絶縁抵抗

O. C. B. 種 別	Bushing 種 別	$\tan \delta$ (%)	静電容量 (μF)	絶縁抵抗 ($\text{M}\Omega$)	温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	備 考
一 次 側 O. C. B.	R 相一次側	2.78	465	4,950	13.5	4月6日測定 湿度 60% RH 湿度は室温
	" 二次側	2.76	457	5,170		
	S 相一次側	2.41	431	4,850		
	" 二次側	3.23	448	5,450		
	T 相一次側	3.31	435	5,760		
	" 二次側	2.08	440	5,650		
2 号主変 外 Bus O. C. B.	R 相一次側	3.60	252	3,510	15.5	4月7日測定 湿度 35% RH
	" 二次側	4.0	262	4,740		
	S 相一次側	3.60	258	3,400		
	" 二次側	3.83	262	3,260		
	T 相一次側	3.45	254	2,700		
	" 二次側	3.04	260	3,190		
2 号主変 内 Bus O. C. B.	R 相一次側	3.77	254	3,290	15.5	
	" 二次側	4.38	260	2,690		
	S 相一次側	4.50	259	2,690		
	" 二次側	3.2	256	3,750		
	T 相一次側	3.09	259	2,320		
	" 二次側	4.20	258	2,560		
接 地 O. C. B.	発電機側	1.2	45.2	3,400	15.5	
	接 地 側	1.4	42	3,000		

表 5.17 PT の $\tan \delta$ および絶縁抵抗 4月6日測定
湿度50~60% RH

種 別*	$\tan \delta$ (%)	静電容量 (μF)	絶縁抵抗 ($\text{M}\Omega$)		温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	備 考
			1 kV	15 kV		
I	1.27	516	4,000	1,500	13	湿度は測定時の 室温である。
II	1.05	517	16,700	4,050		
III	0.78	507	14,300	3,950		
IV	0.77	682	8,330	3,120		

* 種別の欄に示す番号は図4系統図に示す番号である。

70 kV 級以下のコンデンサ形套管の劣化判定基準としては 20 $^{\circ}\text{C}$ における $\tan \delta$ の値が 3.5% 以下を良好, 3.5~5.0% を可, 5% 以上を不良とする基準が一般に用いられている。新品では 0.5~1% が普通である。 $\tan \delta$ の値は温度によって変化するので従来の温度- $\tan \delta$ 曲線を参考にすれば 15 $^{\circ}\text{C}$ 付近の温度では, 3% 以下が良好, 3~4.5% が可, 4.5% 以上が不良となる。表 5.16 の測定結果を分類すると総数 20 本のうち 3% 以下が 6 本 (全体の 30%) で残りの 70% は 3~4.5% の範囲にある。4.5% 以上のいわゆる不良の域にはいるものはないが, 今後の保守点検の際は $\tan \delta$ が 4.5% に近いものから重点的に調査されることを希望する。絶縁抵抗も異常に低いものではなく普通である。

表 5.18 CT $\tan \delta$

(湿度 4月6日 45~60% RH, 4月7日 35% RH)

種 別	印加電圧 (kV)	$\tan \delta$ (%)	静電容量 (μF)	温 度 ($^{\circ}\text{C}$)	測 定 日 時
0	11	28.2	130	15.5	4月7日 9時15分
1-R	2	7.4	280	12.5	4月6日 9時30分
	4	7.5	"		
	6	"	"		
	8	7.52	"		
	10	7.62	"		
	11	7.68	"		
	10	7.62	"		
	8	7.6	"		
1-S	6	7.55	"	12.5	4月6日 9時30分
	4	"	"		
	2	"	"		
	2	6.75	141.3		
	4	6.74	143		
	6	"	"		
	8	6.81	"		
	10	6.88	"		
1-T	11	6.91	142.9	12.5	同 上
	10	6.88	"		
	8	6.83	"		
	6	6.80	"		
	4	6.75	"		
	2	6.77	"		
2-R	2	7.2	268	13.5	4月6日 15時10分
	4	"	"		
	6	"	"		
	8	7.19	"		
	10	7.2	"		
	11	"	"		
	10	"	"		
	8	"	"		
2-S	6	7.19	"	13.5	同 上
	4	7.20	"		
	2	7.22	"		
	2	3.03	292		
	4	"	"		
	6	3.04	"		
	8	3.06	"		
	10	3.10	"		
2-T	11	3.11	"	13.5	4月6日 15時
	11	3.22	288		
	11	3.63	239		
	2	3.51	228		
	4	"	"		
	6	3.53	"		
	8	3.54	"		
	10	"	"		
3-R	11	3.53	"	13.5	4月6日 15時20分
	11	2.9	208		
	11	4.4	242		
	"	5.24	254		
	"	4.70	252		
	11	3.14	232		
	"	2.38	249		
	11	4.85	238		
4-R	"	5.24	238	13.5	4月6日 15時55分
	"	5.25	242		
	11	4.98	395		
	"	4.70	393		
	11	4.98	395		
	"	4.70	393		
	11	4.98	395		
	"	4.70	393		

5.5 PT

$\tan \delta$ および絶縁抵抗の測定結果を表 5.17 に示す。

$\tan \delta$ は測定電圧 11 kV の値で, 絶縁抵抗は 1 kV および 15 kV, DC 1 分値である。なお $\tan \delta$ の電圧特性は, 11 kV まで flat であった。

油入 PT の $\tan \delta$ による劣化判定は図 5.31 に示した Gross の曲線が一般に用いられている。表 5.17 の $\tan \delta$

の値を図示したものが図5.26に示してある。図からわかるとおり $\tan \delta$ の値は良好で、絶縁抵抗も悪くない。静電容量が No. IV だけ他と異なるのは定格の相違である。(I~III は 11 kV 用, IV は 22 kV 用)

5.6 CT

(1) $\tan \delta$

$\tan \delta$ の測定結果を表5.18に示す。電圧特性は全部については測定していないが、ほぼ flat であった。種別の欄に示す符号は CT の番号と相別で、たとえば 1-R は No. 1 CT の R 相を示す。番号は図2.1系統図に示した番号である。

表 5.19 CT 絶縁抵抗
(湿度 4月6日 45~60% RH, 4月7日 35% RH)

種別	絶縁抵抗 (MΩ)				温度 (°C)	測定日時
	1 kV	5 kV	10 kV	15 kV		
0	2,000	918	653	469	15.5	4月7日 9時40分
1-R	—	25,000	9,100	4,050	12.5	4月6日 10時20分
—S	33,000	27,700	10,000	4,840		
—T	33,000	27,700	11,100	6,250		
2-R	2,180	1,980	1,920	1,670	12.5	4月6日 15時
—S	4,760	4,580	4,000	2,110		
3-R	50,000	23,800	13,000	4,000	12.5	4月6日 14時25分
—S	50,000	35,700	13,300	4,290		
—T	14,300	10,000	8,900	4,210		
4-R	33,300	26,300	10,000	4,540	13	4月6日 11時10分
—S	—	41,600	11,500	5,750		
—T	—	50,000	9,550	4,690		
5-R	50,000	21,700	10,000	4,470	12.5	4月6日 14時
—T	—	45,300	16,100	5,760		
6-R	—	33,300	12,500	4,870	13	4月6日 15時35分
—S	50,000	27,700	12,500	4,100		
—T	50,000	23,800	10,400	4,280		
7-R	3,850	3,400	2,530	1,560	15.5	4月7日 11時
—T	5,000	3,650	2,660	1,730		

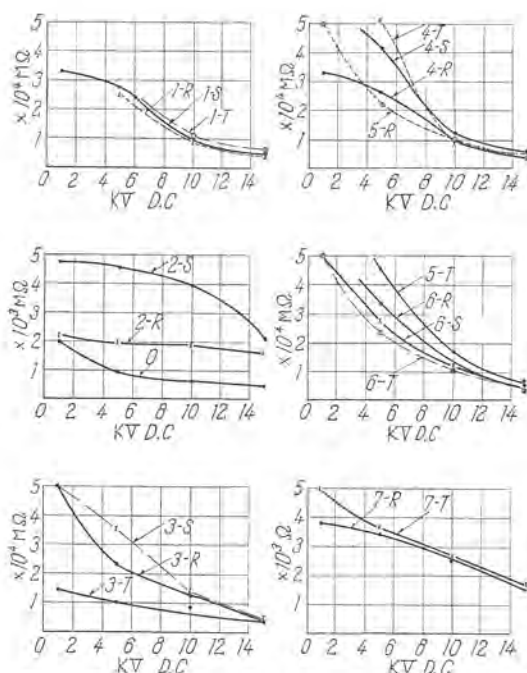


図 5.32 CT 絶縁抵抗—電圧特性

Fig. 5.32 CT insulation resistance—voltage characteristic.

(2) 絶縁抵抗

絶縁抵抗の測定結果を表5.19に示す。1 kV から 15 kV までの電圧特性を測定したが、測定値はいずれも 1 分値である。表5.19の結果を曲線にして図5.31に示す。

考 察

乾式 CT の $\tan \delta$ 値から絶縁劣化を判定する基準は現在確立されたものはないが、大体において定格電圧における $\tan \delta$ が 10% 以下で、かつ電圧特性がほぼ flat であれば良好と判断してさしつかえない。表5.18に示すとおり No. 0, CT は $\tan \delta$ が 28% もあり、他に比較し異常に高く、絶縁は相当悪くなっている。この CT は接地側であるので、常時は電圧がかかっていないが、系統の異常時には電圧がかかることもあり得るので乾燥処理あるいは修理などの処理が望まれる。他は No. 1 CT が 7% 程度で幾分高いが、それ以外は 5% 以下で良好である。電圧特性は 8~10 kV 付近から若干 $\tan \delta$ が増えているが、ほぼ平坦で良好である。

絶縁抵抗は CT の大きさなどによってその値が異なるので一概にはいえないが、測定した 19 台のうち No. 2, No. 7 および No. 0, CT が他のものにくらべて一桁絶縁抵抗が低い。絶縁抵抗の電圧特性は図5.31のとおりで、いずれもかなり急な垂下特性を示しているが、No. 2, CT を除き、15 kV における絶縁抵抗が数千 MΩ あるので、現在運転状態 ($11/\sqrt{3} \times 1.4 \div 9$ kV DC) において破壊する可能性は少ないと考えられるが、絶縁抵抗が高いのは大気湿度が 60% 以下で非常に乾燥しているためであろう。雨期に湿度が高くなると Meg もかなり低下することが考えられるので、今後の経年変化に注意されることを希望する。

5.7 ケーブル

発電機から変圧器までのケーブルについて測定した $\tan \delta$ を表5.20に示す。

表 5.20 ケーブル $\tan \delta$ (4月6日測定)

相別	印加電圧 (kV)	$\tan \delta$ (%)	静電容量 (μF)	温度 (°C)	備 考
R 相	10.9	0.53	0.100	12	温度は室温
S "	10.8	0.56	0.095		
T "	10.85	0.53	0.094		

ケーブルの種類が正確にわからないが、 $\tan \delta$ の電圧特性がまったく flat であることから判断すると恐らく油入ケーブルだと考える。油入ケーブルの新品の $\tan \delta$ は約 0.3% 程度であるが、普通 1% 以上を不良とする基準が用いられているので、ケーブルの絶縁状態は良好であると判断する。

5.8 仕上げ 1,500 HP 用 1,200 kV 直流発電機

(1) $\tan \delta$ および交流電流

測定結果を表5.21および図5.33~5.34に示す。

考 察

定格電圧が 600 V, DC であるから $\tan \delta$ の試験電圧

としては少なくとも $600/\sqrt{2} \div 430$ V, AC は印加すべきであろうが, 電機子の $\tan \delta$ は 260 V, AC までは 6% であるが, 280 V あたりから $\tan \delta$ は急増し, 300 V では 72% という異常な値を指示したので, 試験を中止した. $\tan \delta$ が増加する電圧付近から交流充電電流も急増し 300 V における電流増加率は 12.5% である. この $\tan \delta$ の急増する電圧は試験を繰り返すと変化するように絶縁物表面が塵埃や炭化物などによって非常によごれており, $\tan \delta$ の急増は絶縁物の内部劣化に加えてこの表面の汚損が支配的な影響をおよぼしているようであった. いずれにしてもこのまま使用することはきわめて危険で早急に巻替えなどの処置が望まれる.

表 5.21 1,200 kW 発電機 $\tan \delta$ (4月8日測定)

種 別	電 圧 (V)	$\tan \delta$ (%)	静電容量 (μ F)	交流電流 (mA)	巻線温度 ($^{\circ}$ C)	備 考
電 機 子	200	6.0	0.0805	16.2	18.5	供試機は約 1 ヶ月停止してあった. 室温は 20 $^{\circ}$ C 30% RH
	220	"	"	17.6		
	240	"	"	19.3		
	260	"	"	20.9		
	300	72.0	0.227	27.0		
界 磁	100	5~6	0.0049	7.2	18.5	
	140	6~7	0.0049	10.5		
補極および補償巻線	200	5.0	0.0222	—	18.5	
	250	"	0.0226			
	300	"	"			
	354	7.4	0.0252			
	404	8.0	0.0253			
	354	7.6	"			
	300	7.0	"			
	250	6	"			
	200	6	0.0251			

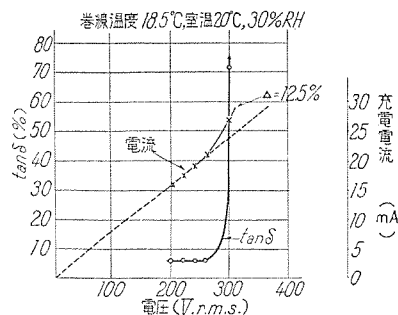


図 5.33 1,200 kW 直流発電機電機子 $\tan \delta$

Fig. 5.33 1,200 kW d-c generator armature $\tan \delta$.

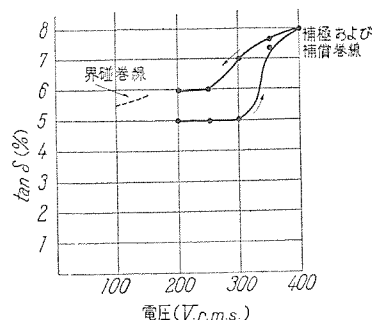


図 5.34 1,200 kW 直流発電機界磁および補極 $\tan \delta$

Fig. 5.34 1,200 kW d-c generator field and interpole $\tan \delta$.

表 5.22 1,200 kW 発電機直流吸収特性

(4月8日測定)

印加電圧 (V. DC)	印加時間 (分)	絶 縁 抵 抗 (M Ω)			巻線温度 ($^{\circ}$ C)	備 考
		電機子	界 磁	補極および補償巻線		
500	0.25	25	2,000	57	18.5	供試機は約 1 ヶ月停止してあった. 室温は 20 $^{\circ}$ C 30% RH
	0.5	28	2,500	59		
	1	31	4,200	59.5		
	1.5	32	5,000	"		
	2	34	6,000	"		
	3	35	6,800	"		
	4	"	7,700	"		
	5	"	8,000	"		
	6	"	8,400	"		
	7	"	8,800	"		
	8	"	9,100	"		
	9	"	9,300	"		
	10	"	9,500	"		

補極および補償巻線も 300 V 付近から $\tan \delta$ が増加し電圧を下げたときの履歴現象も非常に大きい. また界磁巻線は 100 V および 140 V で測定した $\tan \delta$ が測定中に動揺し異常である. 電機子と同様絶縁物が劣化し, とくに表面の汚損が大きく影響していると考えられ, 巻替え修理などの処置が望まれる.

(2) 直流吸収特性

測定結果を表 5.22 および図 5.35 に示す.

成極指数は電機子 1.1, 界磁 2.3, 補極および補償巻線 1.0 である. 界磁巻線は成極指数から判断すると乾燥状態にあり, 表面よごれなども大きくないように判断される値であるが, $\tan \delta$ 測定の際, $\tan \delta$ の値が動揺している

ので注意を要する. 電機子, 補極および補償巻線は成極指数が 1.0 で, $\tan \delta$ の項で述べたとおり, 絶縁物が劣化し, とくに表面の汚損が影響していると考えられる.

6. 総 合 考 察

6.1 2号主発電機

この機は昭和 15 年製作のもので固定子, 回転子の絶縁方式が現在のものとはなはだしく異なっているが, 測定, 点検の結果ならびにこの機の絶縁方式, 運転状況を考慮し総合考察を行う.

(1) 固定子コイル

直流吸収特性測定の結果絶縁抵抗も良く成極指数 (PI) も良いので絶縁物の枯れがあるかも知れないが, 塵埃や吸湿に対しては良好な状態が保たれている.

絶縁抵抗—電圧特性よりわかるように現状では規定電圧

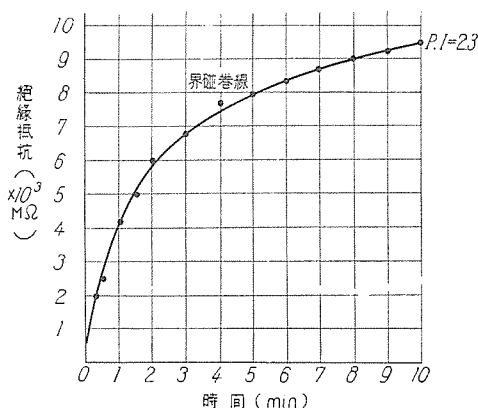
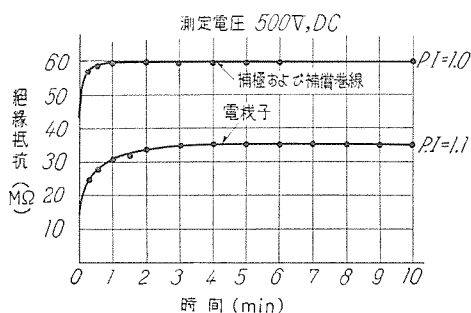


図 5.35 1,200 kW 直流発電機直流吸収特性

Fig. 5.35 1,200 kW d-c generator d-c absorption characteristic.

で絶縁破壊するとは考えられない。

しかし、 $\tan \delta$ —電圧特性では規定電圧 $11 \text{ kV} \div \sqrt{3} = 6,350 \text{ V}$ 以下の $5,000 \text{ V}$ 付近からコロナが発生していることがわかる。これは各相バランスしているの、特定の位置が不良ではなく全般的に発生しているものと判断される。

これは直流分法、交流電流法においても同様 $5,000 \text{ V}$ 付近からコロナが発生していることがわかる。

コロナ発生の原因についてはこのコイルはコアに納める直線部はブラックボンドマイカラップをフォーミングマシンと称する機械で絶縁にしわや空隙ができないように、加熱アイロニングしながら導体に巻付け絶縁したものである。経年の運転による枯れの外に製鉄所特有のミル運転による負荷変動、すなわち $7,000 \sim 8,000 \text{ kW}$ の週期的負荷変動で導体と絶縁物、絶縁物と鉄心の膨張係数の差によりそれぞれ深部マイカ剥離および表被マイカ剥離を起している可能性が大である。

コイル表面にはアスベストテープを巻いて半導体のコロナ防止塗料で処理を施してあるから、鉄心とコイル間の外部コロナは出ない構造になっている。

しかし長年使用中上記の週期的負荷で鉄心とコイルが摩擦しコロナ防止塗料が剥離することも考えられるが、この機は主として前記の経年の枯れと剥離現象によるボイドコロナが発生しているものと考えるのが妥当であろう。

コイルのエンドバンド部はリノータープの絶縁である。これも経年の枯れによって脆化していると考えられる。外観点検ではエンド部の変形はなくコイルのバンドのゆるみや切れもなく良好の状態であるが短絡事故が発生すると電磁力の衝撃で脆化しているコイルエンド部に亀裂を発生する恐れがある。

また直線部のマイカラップとエンドバンド部のリノータープの絶縁の継目は二段のテーパ継ぎで境界のクリーページパスを長く取ってあるが、経年の枯れと前記膨張収縮により剥離が懸念される。

これの接続部は鉄心スロットの外部であるから、コイル表面を清浄にして大地とのクリーページパスを良い状態に保守することが望ましい。

結局、固定子コイルは今すぐ絶縁破壊を起すという危険な状態にあるとは考えられないが、使用電圧でコロナが発生していることでもあり、また短絡などの衝撃に対し亀裂を発生する恐れがあるので、予備コイルを用意して事故に備えとともにプラント全体の保守と関連させて巻替えの補修計画を立てて置くことが望ましい。

なお、予備コイルとしてはダイヤラスチック絶縁のコイルを推奨する。これは週期的負荷変動に対して熱膨張係数が導体とほぼ等しく弾性が大きいのでマイカ剥離現象に対してとくに強いほか、耐電圧、誘電体損、耐湿性など従来の絶縁に比べていずれもすぐれている。したがって固定子の容量も $5 \sim 10 \%$ 増加するような新コイルを設計することも可能である。

(2) 回転子コイル

絶縁抵抗が常温にて $0.05 \sim 0.1 \text{ M}\Omega$ に低下しており、 $\tan \delta$ 値も悪い。

これは炭素、鉄粉、塩分の塵埃によりリーケージパスができてコイルが全般的に劣化していると判断される。

全速時には遠心力によりこの塵埃が圧縮され、密度が増して絶縁抵抗はさらに低下し、 $4,000 \text{ }\Omega$ 程度になる。

温度—メグ特性は普通良好なものは温度が $10 \sim 15^\circ\text{C}$ 下るごとにメグ値が約 2 倍になるのが普通であるが、この回転子は逆に温度低下にしたがって、メグが逆に低下している。これは塵埃中の塩分が室温近くなると潮解し吸湿によるものと考えられる。

この絶縁の構造からこれの改善は保持環を抜き、さらにウェッジを抜いて掃除と洗浄を要する。さらに固定子コイルの場合と同様に $7,000 \sim 8,000 \text{ kW}$ の週期的負荷変動により遠心力で圧縮された状態で導体が熱膨張収縮を繰り返しているの、スロット絶縁のマイカナイト ⑩ やウェッジ下のマイカナイト ⑪ および保持環下のマイカルタ絶縁 ⑫ (図 5.24 参照) の磨耗が生じている懸念がある。また経年の劣化としてのスロットセルの接着剤が枯れマイカの剥離を起している恐れがある。

このような状態で小康を保ちつつ無事運転できれば幸であるが、なんらかの原因たとえば線路の接地や短絡事故で回転子コイルに異常電圧が発生した場合、弱点付近で接地を起す可能性があり、この場合 1 点接地の状態では運転が継続されるが全体的に絶縁が低下しているからまた他の点で接地を起す懸念がある。

このような 2 点接地を発生すれば磁束のアンバランスにより異常振動を誘導し基礎や軸受などにまで害をおよぼし、また回転子コイルにも過電流が流れ衝撃により二次的に固定子コイルにも損傷を発生する恐れがある。

結局、回転子コイルは多量の導電性吸湿性の塵埃が深部に浸入し、絶縁が極度に劣化しており、この状態ではいつ接地を起すかも計りがたい。

とくに塵埃中の塩分は湿度が上がるとメグをはなはだしく低下させるので、長期停止後や湿度の高い雨期には使用電圧でも接地を生ずる恐れがあるので工場へ持込みコイル巻替え絶縁更新を早急に行うことが望ましい。

なお、長期停止時や高湿度の雨期に塩分を含む塵埃の吸湿による異常メグ低下を防ぐ方法として通風路内にスペースヒータを入れ回転子温度をつねに室温より 10°C くらい高く保つことが望ましい。

(3) 通風路の気密保修

長年使用した機器では多少の差はあるが、若干の塵埃の浸入はいずれにも認められる実状であるが、製鉄所では外気に塵埃の含有が多いと思われるので、5.1.(6)b-4. に述べたような通風路の気密を点検保修することが望ましい。

(4) 励磁機

絶縁抵抗、成極指数 (PI)、絶縁抵抗—電圧特性ともに

良好である。

整流や振動の点も良く現状では通常の保守で十分と考えられる。

6.2 2号主変圧器

$\tan \delta$ の値、絶縁抵抗ともに良好で、今後も従来どおり定期的に保守点検を実施し、経年変化を観察する程度で十分だと考える。

6.3 予備変圧器

$\tan \delta$ の値、絶縁抵抗ともに良好で心配はない。

6.4 OCB 用套管

現在一般的に用いられている $\tan \delta$ の劣化判定基準から判断すると測定した 20 本の OCB 用套管のうち 6 本は良好の範囲にはいり、残りは普通の部類である、とくに不良のものはない。しかし不良限界ぎりぎりのものも 2, 3 本あるようで、今後の保守試験の際はこのようなものから重点的に経年変化を観察されることを希望する。

6.5 PT

$\tan \delta$ の値および絶縁抵抗ともに良好で心配はない。

6.6 CT

発電機の中性点に接続されている CT は $\tan \delta$ が 28 % もあり他のものに比較して異常に高いので、乾燥処理などを実施された上でさらに特性を測定し、不良原因を除くよう処置される必要がある。これ以外は $\tan \delta$ も絶縁抵抗値も良好であるが、絶縁抵抗—電圧特性はかなり垂下特性を示し良好ではない。 $\tan \delta$ 値や絶縁抵抗値が良いのは測定がちょうど乾燥期であったためとも考えられるので、今後の経年変化に注意されることを希望する。

6.7 ケーブル

絶縁状態は普通であり心配はない。

6.8 仕上げ 1,500 HP 用 1,200 kW 直流発電機

(1) 電機子

$\tan \delta$ は 260 V までは 6 % で低いが、280 V から急増し、300 V では 72 % にも達したので、それ以上電圧印加するのを中止した。成極指数も約 1 で悪い。 $\tan \delta$ の急増する電圧は数回試験を繰り返したところ 260~300 V くらいで変化し、絶縁物の表面状態の影響がこのような特性を示すおもな原因のように考えられた。絶縁物を

点検の結果はコイル絶縁物が相当もろくなっているようであるが、さらに絶縁物表面に 1~2 mm くらいの炭化状の塵埃が一面に付着しており、この成分は分析していないが、恐らく 2 号主発電機の回転子に付着している塵埃と似たような成分(表 5.11 参照)のものと思われる。このままの状態ではきわめて危険で早急に巻替えが必要である。とくに湿度が高い状態での運転は危険で、また運転休止後ふたたび運転される場合には電熱器その他で十分乾燥してから運転されるなどの注意が必要である。

(2) 界磁巻線

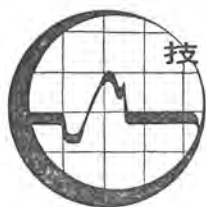
成極指数は 2.3 で絶縁抵抗も高い。成極指数が割合に高いことはコイルが乾燥状態にあり、電機子のような絶縁物表面の塵埃の影響も大きくないと一応考えられるが、しかし 100 V および 140 V で測定した $\tan \delta$ の値が測定中に動揺し、異常であり注意を要する。点検の結果絶縁物は相当もろくなり表面でところどころコンパウンドがはげている所もあり、塵埃の付着も認められる。 $\tan \delta$ の異常動揺はおそらく測定中表面状態が変化することに起因するものではないかと考えるが、詳細は不明である。いずれにしても電機子とともに巻替えられることを推奨する。

(3) 補極および補償巻線

成極指数は 1 で $\tan \delta$ の値は 300 V で急増し、電圧を下げたときの履歴現象も大きい。絶縁特性が不良である原因は電機子の項で述べた事項がそのままここでも適用できると考えられ巻替えが必要である。

7. む す び

2 号主発電機、変圧器、OCB、PT、CT などの絶縁特性および 1,200 kW 直流発電機の絶縁特性について報告し、外部点検結果ともあわせて簡単な考察を加えたが、この試験にあたり種々ご配慮を賜った富士製鉄本社 明石建設部長、芝崎技術部長、室蘭製鉄所平也所長、平田工務部長、平松管理部副長を始め、測定にあたり直接ご援助、ご指導をいただいた阿部保全掛長に深謝する。また測定に直接ご協力を賜った発電機小原技術員始め掛員の方々に感謝の意を表する。



変 圧 器 (1)

— 変 圧 器 定 格 —

変圧器の設計は、出力 (kVA)、電圧 (kV)、周波数 (c/s)、相数 (単相または三相)、結線 (星形または三角形) で決まる。火力発電所では通常発電機 1 台に対して変圧器 1 台のいわゆるユニット・システムが採用されるから、主変圧器の出力は発電機出力と同一で、かつもっぱら三相変圧器が用いられ、発電機出力の増大に伴って変圧器単器容量もいちじるしく増大の傾向にある。すでに最大 200,000 kVA のものまで製作されており、さらにより大容量の変圧器も計画されている。

電圧は発電機電圧 6,600 V ないし 18,000 V から、都心に近い送電電圧に昇圧するものであるから、その二次電圧は比較的低く、66 kV、77 kV または 110 kV が普通であったが、最近では容量の増大にともない電圧も高くなって 154 kV からさらに 275 kV までに至っている。一次定格電圧は全負荷において二次定格電圧を保つために、変圧器内の電圧降下を補うだけ過励磁する必要があるから発電機電圧よりも 5% 低く選定し、二次定格電圧は送電線の電圧降下を補うため公称電圧の 110% とされる。発電所用変圧器は標準電圧規格で A 種と呼ばれ、上記定格電圧のほかに二次側に上下 $\pm 5\%$ のタップ電圧が設けられるのが標準である。

結線は二次高圧側は中性点接地のため星形とすることが必要で、したがって一次側は第 3 高調波電圧抑圧のため三角形結線

とされる。

以上の定格要素のほかに、インピーダンス電圧、冷却方式 (後述)、設置場所なども設計上考慮すべき問題である。

変圧器のインピーダンス電圧は電圧変動率および系統安定度の点からは小さいほうが望ましいが、一方小に過ぎれば短絡電流が増大して変圧器自体の機械的、熱的の損傷の原因となり、また遮断器の遮断容量を増大させる。電圧が高いほどインピーダンス電圧は大きくなる傾向にあり、一般の電力用変圧器では 66 kV および 77 kV 級 7.5%、110 kV 級 9%、154 kV 級 11%、275 kV 級 10 ないし 12% が標準とされているが、火力発電所用変圧器のばあいには遮断容量の点を重視して標準インピーダンス電圧よりやや高目に採用されることが多い。しかしあまり標準よりかけはなれた値のインピーダンス電圧に設計すれば、特性の低下と価格の増大をきたすことになる。

火力発電所は海岸に建設されて塩風を受けることが多いから、塩害によるブッシング閃絡電圧の低下について考慮することが必要で、最近の大きな問題になっている。変圧器を建屋内に設置し使用すれば問題はないが、屋外設置のばあいにはブッシングの電圧階級の一段または二段上のものを使用し、さらに活線洗浄まで行われるようになった。図 1 は東京電力新東京火力発電所用 92,000 kVA 送油風冷式変圧器の本体で、屋内に設置されており、図 2 は屋外に別置された冷却器である。



図 1 東京電力新東京火力発電所向 92,000 kVA 変圧器
(屋内設置)

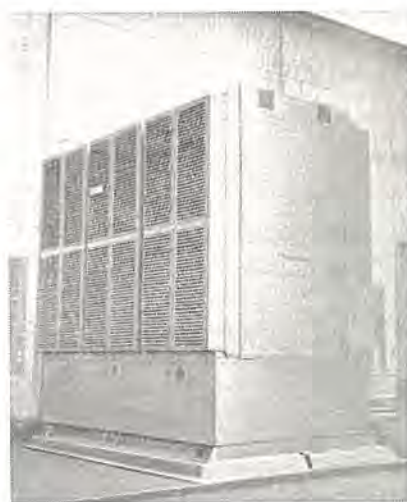


図 2 東京電力新東京火力発電所向 92,000 kVA
変圧器用屋外冷却器

— 変 圧 器 の 形 式 —

変圧器は構造上、外鉄形と内鉄形に2大別されることは周知のとおりであるが、両者ともそれぞれ特長を有しているので使用上外鉄、内鉄の区別をする必要はない。わが国で大容量変圧器に外鉄形を採用しているのは当社だけで、これが三菱大形変圧器の大きな特長となっており、従来からのサージブルーフ形絶縁構造、最新の Form-Fit Tank や特別三相式構造などはいずれも外鉄形の特長をもっともよく発揮した構造である。

いま簡単にこれらの構造について述べれば、まずサージブルーフ形絶縁構造は、衝撃電圧に対して本質的にすぐれた特性を有している外鉄形変圧器コイルに、さらに簡単な改良を加えてより合理的な絶縁構造としたものである。

つぎに Form-Fit Tank は、変圧器のタンクを中身にぴったり適合するように造ったもので、下部の端枠がタンクの下部と一体となり、鉄心と巻線はこの上に組立てられ、その上に上部タンクをかぶせる構造で、重量、油量、外形寸法の軽減、つり上設備と空間の節約、すぐれた冷却効果(とくに送油式に対し)その他多くの特長を有するものであり、サージブルーフ形絶縁構造とともに外鉄形変圧器の標準構造になっている。

第3の特別三相式構造は、普通の三相変圧器では重量または寸法制限により組立輸送できないばあい、組立輸送の目的でとくに採用されるもので、外鉄形変圧器において各相共通の一部鉄心を大きくして各相の磁気回路を独立させ、各相に分離して中身を下部タンクと中部タンクの中に組立て、べつべつに輸送を行い、現地において三相組合わせ作業を行う構造である。

最近完成した関西電力大阪火力発電所用 190,000 kVA 変圧

器および九州電力荊田火力発電所用 190,000 kVA 変圧器(図3)には特別三相式構造を採用しているが、現在製作中の変圧器輸送用超大形貨車が完成すれば、二巻線変圧器のばあいには 30 万 kVA 程度まで組立輸送が可能となるので、都心に近く輸送条件に恵まれている火力発電所用変圧器は、すべて普通三相構造で組立輸送できるものと思われる。

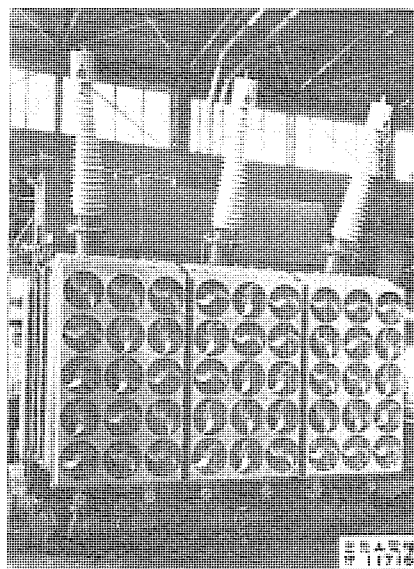


図3 九州電力荊田火力発電所向 190,000 kVA 送油風冷式変圧器 (U フィン管式)

— 冷 却 方 式 —

1. 油入自冷式変圧器

油入自冷式変圧器は設備が簡単で運転が容易であり、信頼度および耐久度の高い点でもっとも普通に採用され、50,000kVA 程度の変圧器まで製作できる。しかし大容量器になると放熱器数が多くなり、油量、価格、床面積が増大するので、とくに要求がないかぎり 30,000 kVA 以上の大容量器には自冷式は推奨しない。

2. 油入風冷式変圧器

自冷式の放熱器は送風機を取りつけることによって、油入風冷式にすることが容易にできる。送風機を取りつけると、その放熱効果は 150% ないし 200% に増加し、変圧器出力としては一般に 20% ないし 40% 増大することになる。放熱器の取り付け方は一列の 4 ないし 8 個の放熱器にたいして、側面から

2 ないし 4 個の送風機で吹き通す方式を標準としている。10,000 kVA 以上の大形変圧器ではこの方式を採用することによって、放熱器数を 67% ないし 50% にすることができ、すえ付面積や油量をそれだけ減少することができるが、この方式も 30,000 kVA 以上の大容量器には推奨しない。

3. 送油風冷式変圧器

送油風冷式変圧器には、単位冷却効果の大きい U フィン管放熱器を使用するものと、自冷式と同一の放熱器を使用して三重定格を目的とするものの 2 様式がある。

U フィン管は管の表面に銅線を鎖状にまきつけ、これに強い風を送って放熱効果をいちじるしく増し、一方油を強制循環して油の対流と熱の伝達を促進したもので、1 組の放熱器で 50 kW ないし 100 kW の熱を放散し得て、普通の放熱器の 10 倍ないし 15 倍の効果があり、したがって床面積も油量もいちじ

るしく減少することとなる。一方油の循環がよくなり、上下の油温の差は少なく、コイルと油の温度差も少なくなる利点がある。したがって最近の 30,000 kVA 以上の大形変圧器には、ほとんどこの方式が採用されるようになっている。図 2 は U フイン管放熱器を使用した別置き冷却器であり、図 3 は九州電力 荻田火力発電所に納入した 190,000 kVA 変圧器で、このように U フイン管放熱器を直づけするのが標準構造である。

U フイン管式は冷却効果を最大限によくしてあるので、油ポンプおよび送風機全停のばあいには連続の自冷容量はない。自冷容量を要求されるばあいには、自冷式の標準の放熱器を使用して、油入風冷式のばあいの放熱器群を一側面共通のヘッドを通して、1 個の油ポンプで強制循環させる方式を採用する。したがって自冷/風冷/送油風冷のいわゆる三重定格とされるのが普通で、その容量比は一般に 60/80/100% である。図 4 は中国



図 4 中国電力小野田火力発電所向 42,000 kVA 送油風冷式変圧器（三重定格式）

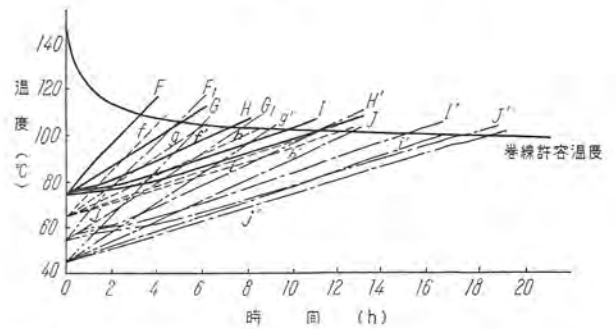
電力小野田発電所納入 42,000 kVA 三重定格送油風冷式変圧器である。

4. 油入水冷式および送油水冷式変圧器

水冷式は保守がめんどうであるから最近では一般に用いられない。据付場所がとくに狭いばあい、あるいは積雪はなほだしく送油風冷式の不適当なばあいなどに採用されるに過ぎない。

5. 各冷却方式選定の標準

上記冷却方式の選定にあたって標準を示せばつぎのとおりで



100% 負荷連続使用後、ファンおよびポンプを停止した場合
 P, G, H, I, J それぞれ 100%, 75%, 25% 負荷および無負荷継続
 時間に対する巻線最高温度 } 周囲温度 40°C
 f, g, h, i, j " 油の最高温度 }
 P', G', H', I', J' " 巻線最高温度 } 周囲温度 20°C
 f', g', h', i', j' " 油の最高温度 }

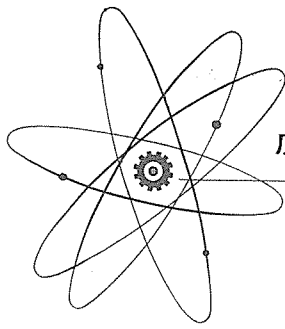
図 5 100,000 kVA 三相超高压変圧器短時間耐量

ある。

- 10,000 kVA 以下 自冷式
- 20,000 kVA " 自冷式または油入風冷式
- 30,000 kVA " 油入風冷式または送油風冷式
- 30,000 kVA 以上 送油風冷式（三重定格式または U フイン管式）
- 50,000 kVA " 送油風冷式（U フイン管式）
（送油水冷式）

6. 送油式変圧器の補助機停止時の使用耐量

自冷式以外の冷却方式を採用しても、現今のように信頼度の高い補助機の使用により、従来の自冷式と同様保守にも手数を要せず、十分安心して使用できるわけであるが、機器の故障以外に補助電源の事故や、その回線器具の故障などによって、送風機、油ポンプまたは冷却水が停止するばあいも考えられる。このようなばあいでも大形変圧器ではそれ自体の熱容量のため 1 ないし 2 時間の短時間はその熱が構成材料によって吸収されて温度上昇が小さく、支障なく全負荷運転ができる。また補助機全停のばあいでも若干の自冷容量があるので、これを考慮していま 100,000 kVA 送油風冷式超高压変圧器について短時間耐量を計算してみると図 5 のようになる。図において巻線許容温度曲線に交わるまでの耐用時間を横軸に示している。周囲温度 40°C と 20°C の二つのばあいの 100% 負荷から 0% 負荷鉄損のみのおのおのについて示され、油の温度上昇 25°C、100% 負荷におけるコイルと油との温度差 10°C のばあいを示すものである。（伊丹製作所 村上 有）



SHIPPINGPORT 原子力発電所

三菱原子力工業株式会社

渡辺泰男*・渡辺信三*・川口 修*

第1章 PWR 発電所概説

第1節 ま え が き

原子力の発展とともに、今までに多くの種類の原子力設備が提案されている。数種の原子力発電施設については設計が進められており、いくつかは建設途上にある。しかし米国において完成している原子力発電所はただ一つ——それはピッツバーグに近い Shippingport 原子力発電所である。

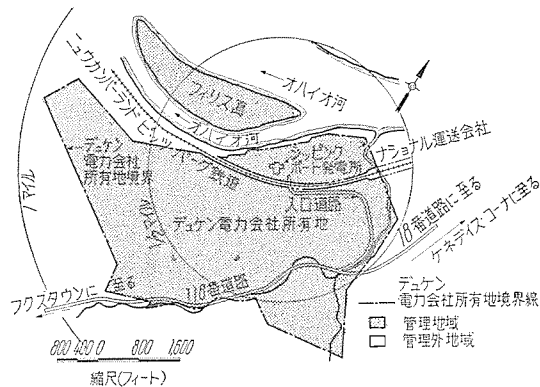


図 1.1 Shippingport におけるデュケン電力会社の所有および管理地域

この新しい発電所は多くの点で重要である。その一つはこれが米国原子力発展の重要な道しるべであるということである。しかしそれに劣らず重要なことは、その開発および運転によって得られる経験と技術である。この知識の重要性を過小評価してはならない。現在のほとんどすべての原子炉は先端的な試作品であるが、これらから得られる資料はさらによいものを作るのに必要なものである。原子核施設を紙上で設計することはたやすいが、開発し建設して初めて問題が本当に解かれる。

Shippingport 原子力発電所は熱源として加圧水形原子炉施設を持っている。多くの形の小型実験炉が作られているが、潜水艦ノーチラス号にも使われている加圧水形の技術がもっとも進んだものである。Shippingport 原子力発電所にこの形が選ばれた理由の一つはそこにある。

第2節 加圧水形原子炉の特色

原子力施設と在来の施設との根本的な違いは熱源にあるといわれているが、この表現はあまりに単純化し過ぎている。熱源がまったく新しいことに加えて、原子力施設では全施設の設計と操作にも大きな違いがある。

図 1.2 に示すように加圧された水は独立した 2 系統からなる。すなわち、熱を発生する原子炉を含む一次系統と、蒸気タービンへ熱を送る二次系統である。一次系をポンプで循環する水は原子炉内の核燃料の表面を流れて熱を吸収し、蒸気発生器に送られてその熱を二次側の流れる水に移す。

全一次系は高压に保たれるので、一次系の冷却水は沸騰しない。二次系の水は比較的低圧に保たれるので、二次系の水は蒸気発生器で熱を受けて蒸気になり、それによってタービンを動かすに必要なエネルギーを得る。

原子炉は連鎖反応を持続するのに十分な分裂性物質を含んでいるが、連鎖反応は中性子を吸収する制御棒によって起動、停止、および制御される。この棒が炉心に挿入されると出力状態が下がり、引抜かれると出力状態が上がる。

加圧水形原子炉はいろいろな特色を持っているが、その一つは一次系統が物理的に二次系統と分離されている、すなわち一次系の水は二次系に入らないということである。それで、分裂生成物が一次系水の中へ漏れ出ることがあっても、それが二次系に移ってそこを汚すことがない。したがって運転中も二次系の大部分については保守作業が可能である。

他の一つの特徴は、本質的には放射源を原子炉内に閉じ込めるように設計してあるということである。燃料を包む被覆が破損した時にだけ分裂生成物は一次系に漏れてくる。そしてもしいくらかの分裂生成物が一次系に漏れても、系の水は絶えず浄化されているので、停止後数分たてば原子炉を除いては保守作業をすることができる。

一次系の水が加圧されているのにはいくつかの理由があるが、おもな理由は沸騰を押えることである。原子炉内の沸騰を許す設計も可能で、実際そういう設計もなされているが、この原子炉では沸騰を押える設計が採られた。

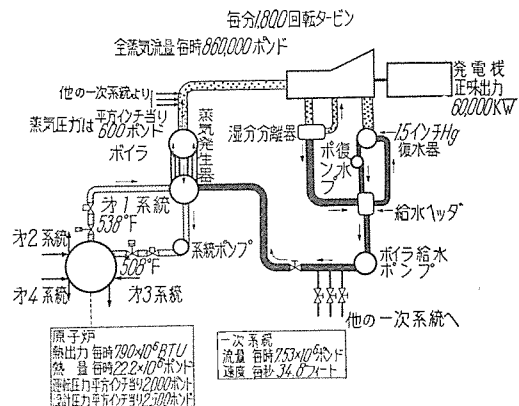


図 1.2 PWR の一次系および二次系

一次系の水は冷却材および中性子減速材という二重の機能を持っている。核分裂によって放出される中性子は速い速度を持っている。水の分子との衝突によってエネルギーを失って熱中性子になり、ウラン 235 に吸収されて核分裂を起す効率がもっとも良くなる。

加圧水形原子炉のもっとも重要な特色は負の反応度温度係数を持つように設計することができるということである。その結果原子炉は設定された動力状態を保持しようとする傾向を持つ。たとえば原子炉にはいる水の温度が何かの理由で下がると、原子炉は自動的により多くの熱を発生して出口温度を前より上げる。それで適当に設計された加圧水形原子炉では、外部からの制御なしに、自動的に正しい出力状態を保持する。この出力状態保持の特色は電力系統からの正常な負荷変動に対して役立てることができて、制御棒の動作は大きな出力変動の時にしか必要でないことになる。

第 3 節 PWR 発電所

原子炉の基礎的概念は簡単であっても、実際の施設の設計という問題は別である。多くの構成要素が開発され試験されなければならない。各要素はあらゆる点で他の要素と調和するよう設計されなければならない。また設計に従って完全なものを作ること大きな段階である。しかし、PWR は最先端の試作品であるにもかかわらず、定まった電力系統の要求に適合するよう設計されている。

原子力委員会によってウエスチングハウス社のために作られた仕様は次のようなものであった。

この発電所は 600 ポンド蒸気圧力によって 60,000 キロワットの正味電気出力を持つこと。

原子炉は 2,000 ポンド圧力の天然の水によって冷却されること。

最初の炉心は全出力 3,000 時間の寿命を持つこと。

燃料取替えは最小の停止時間で行われること。

原子炉制御系統はできる限り簡単であること。

可能な限り市販の装置を使用すること。

発電所の運転費用は、上記の要求を満たした上でできる限り少ないこと。

原子炉の各要素の詳細は後章（第 2 章、第 3 章）に譲って、ここでは原子炉の部分品に要求される特殊な性質の例として、一次系水駆動ポンプを見よう。

これらのポンプは大きさも能力も在来のもものと別段違ってはいないが、一つの点でまったく異なっている。普通のポンプは駆動される液体の中に羽根車を持ち、外部のモータから軸によって連結される。軸の回りは密封されるけれどもどんなに良く作ってもいくらかは漏れがある。一次系では駆動される液体には放射性物質が含まれることがあるので、漏れがないように作られなければならない。この理由で PWR では特殊なポンプが使用されている。キャンドモータポンプと呼ばれるこのポンプでは、羽根車、軸、モータ回転子のすべてが、駆動される液体の中に浸されていて、周囲を圧力に耐える容器でまったくおおってあるので、液の漏れる心配がない。

4 個の蒸気発生器からの蒸気はタービンに送られ、復水器に行き、ポンプによって蒸気発生器にもどる。タービン発電機は定格 100,000 kW で、毎秒 1,800 回転の単シリンダ形である。100,000 kW 出力の場合、熱消費率は 11,835 Btu/kWh で

ある。新鋭火力のタービンよりいくらか低圧で運転し、したがっていくらか大形であるという以外に、特別に新しい設計のものではない。

第 4 節 発電所の特性の選定

PWR 原子力施設の運転条件を決めることはむずかしい仕事であった。値段とか開発途上の問題など多くのことを考慮しなければならなかった。最後の結果は多くの対立する要素の妥協であった。いくつかの例によってその様子を知ることができる。

一次冷却水の温度と流量は、ポンプの費用、蒸気発生器の費用、炉心の費用の間の適当な調和を選ぶことで決定された。原子炉入口温度と原子炉熱出力を一定とすれば、冷却水流量を増すことによって炉心の費用は下がりポンプの費用は上がる。一次冷却水の平均温度を上げると、蒸気発生器の費用は少なくなるが炉心の費用は増す。蒸気発生器の熱交換面には炉の燃料の表面ほど費用がかからないので、蒸気発生器の面積はできるだけ広く取られた。

炉心内の圧力損失はポンプの費用を増すことになるが、炉心の燃料表面に要する費用を少なくするためには、ポンプの費用が増すこともやむを得なかった。

蒸気発生器内の飽和蒸気圧は他の特性とつりあう限りできるだけ高く選ばなければならない。PWR に用いられている範囲においては、蒸気圧と温度が高いほど熱効率はよくなり蒸気系統の費用は下がる。比較的低压の飽和蒸気を使うため、より多くの蒸気流量を要し、最近の発電所に比べて大形のタービンを使うことになっている。

第 5 節 PWR 発電所の配置

原子炉系の配置は図 1.3 に示すとおりで、一次系は全部地下に収められていることは注目すべきことである。

これは最初の大形原子力施設であるので、どんな事故にも対処できるよう、また施設を災害から守るため特別の注意が払われている。このため一次系は 4 個の容器（コンテナ）の中に収められている。

このうち 1 個は直径 38 フィートの球で原子炉本体を収容する。他の 3 個は両端が半球形になった円筒である。このうち 2 個は 2 本ずつの一次冷却水系統を収め、他の 1 個は加圧器と補助系統を収める。

1 インチの鋼で作られたこれらのコンテナは費用のかかるもので、将来は不用になるものであるかも知れないが、きわめ

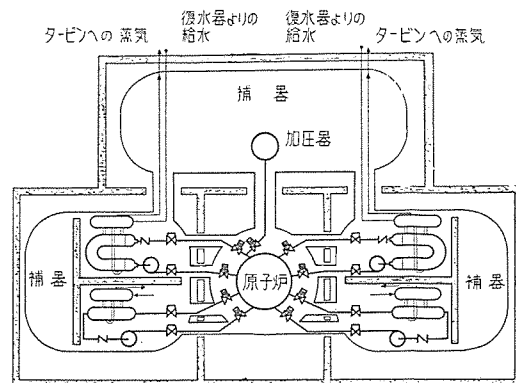
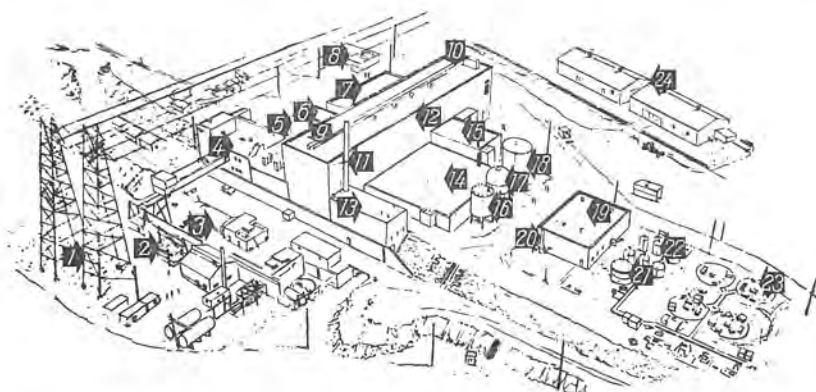


図 1.3 コンテナ内の一次冷却水系の配置



- | | |
|------------------------|----------------------------|
| 1 送電線鉄塔 | 13 空気調節室 |
| 2 変圧器 | 14 補器室および西側ボイラ・コンテナ (建物の下) |
| 3 タービン発電機 | 15 燃料貯蔵庫 |
| 4 制御室、送電盤、管理事務室 | 16 タービン発電機系の復水タンク |
| 5 この建物の下に東側ボイラ・コンテナがある | 17 一次系水タンク |
| 6 補器室 | 18 木槽用貯水タンク |
| 7 研究室 | 19 廃棄物処理建物 |
| 8 守衛所 | 20 焼却器用および廃棄ガス放出用煙突 |
| 9 原子炉の位置 (地下) | 21 スプレッド循環用タンク |
| 10 除染および炉心組立て室 | 22 検査および特殊監視用タンク |
| 11 コンテナ空気処理煙突 | 23 崩壊タンク |
| 12 燃料処理木槽建物 | 24 仮設建造物 |

図 1.4 シッピングポート発電所

表 1.1 発電所建設年表

1953年 7月	ウツ社と AEC 間で PWR 設計契約成立
1954年 1月	原子炉の予備設計の決定 デュケン電力会社の提案採択
1954年 3月	シッピングポートに敷地決定
1954年 5月	主要部品の発注開始 (蒸気発生器)
1954年 9月	アイゼンハワー大統領出席の下に地鎮祭挙行
1955年 1月	炉心燃料をシード、ブランケット形にすることに決定
1955年 4月	ブランケット燃料を UQ ₂ に決定
1955年 8月	コンタリット打込開始
1955年 12月	炉心の製作開始
1956年 5月	タービンプラント最初的主要部品、給水加熱器の据付完了
1956年 7月	廃棄物処理系の建設に着手
1956年 8月	原子炉プラント最初的主要部品、熱交換器の据付
1956年 10月	主冷却系配管の接合開始 原子炉容器の据付
1956年 11月	建設工事従業員数ピークに到達 (1779名)
1956年 12月	主冷却系ポンプの据付
1957年 7月	主冷却系配管 (18 吋) 完了
1957年 8月	主冷却系水圧試験 (3750 psi) 施行
1957年 9月	主冷却系の高圧フラッシュ
1957年 10月	タービン発電機据付完了 炉心の装荷
1957年 12月	原子炉容器に冷却水充填 臨界試験
1958年	出力運転

てわずかの可能性を持っているある種の災害に対処するための特別の安全策として設けられた。放射性の物質が原子炉から漏れた場合、たとえそれが放射性的の蒸気であっても、汚染はコンテナ内部だけに限られる。

所内建造物の配置を図 1.4 に示す。

第 6 節 PWR 発電所と電力系統

デュケン電力会社はピッツバーグを含む都市地域に送電している。シッピングポート発電所ができる前の系統の容量は 1,207,000 kW であった。この系統は通常は 32,000,000 kW の容量を持つ連結された系統の一部となっている。工業に対する送電が多いので、この系統の最大負荷は昼間に起る。工業への送電は系統の出力の 55 % を占め、いくつかの鋼鉄ストリップミルや多くの大形電気炉を含んでいる。その結果として、この系統の負荷は変動が激しく、系の出力は 60,000 kW から 80,000 kW の中でしばしば急な変動を要求される。

PWR 発電所の負荷変動に対する能力は、高圧蒸気と石炭ボイラを使用するデュケン電力会社の他の発電所に比べて、同様かまたはさらに良い。原子炉が本質的に自己調整の能力を持つので、負荷変動に対して従来の発電所より安定である。100 MW の能力を基にした計算によって、PWR 発電所は、毎秒 3 MW の割合で ± 15 MW までの傾斜変動、毎秒 0.4 MW の割合で ± 20 MW までの傾斜変動、および $+15$ MW または -12 MW のステップ変化に応ずることが要求される。このように PWR 発電所はデュケン電力会社の完全な一部としての役割を果たせるよう設計されている。

第 7 節 む す び

以上が PWR 発電所の概要であるが、原子力施設とし

表 1.2 PWR 特性表

設置場所:	ペンシルベニア州シッピングポート
注文主:	米原子力委員会
運用者:	デュケン電力会社
主要契約者:	ウエスチングハウス電気会社
建設工事:	メトラン・アンド・ウ・アス・タ
完成期日:	1957 年 12 月 18 日
出力、熱:	231 MW th
電気:	60 MW ^e
主要機器要目表	
圧力容器	
高さ	32.1 ft
内径	9 ft
壁厚	8.1 in
材質	炭素鋼
減圧	材質 厚さ
	不銹鋼 (304) 0.25 in
設計圧力	2,500 psia
試験圧力	3,750 psia
炉 心	
形状	円筒形
寸法	6.8 ft 直径 \times 5.9 ft
燃料装荷量	75 kg
天然ウラン	14.16 ton
シード構成	軽水 52.6 体積 %
	ジメチルウラン 34.1 体積 %
	ウランウミ 13.3 体積 %
ブランケット構成	
	軽水 43.5 体積 %
	酸化ウラン 30.0 体積 %
	ジメチルウラン 26.5 体積 %
寿命	シード 3,000 fph 以上
	ブランケット 8,000 fph
転換比	1.1
制御棒	
形状	十字形
本数	32
全制御棒量	25.6 % $\Delta K/K$
吸収体全長	71.5 in
吸収体材質	ハフニウム
重量	55 lb
引抜速度	11 in/分
緊急停止時間	1.35 秒
制御棒駆動装置	
形式	折返式回転子
個数	32
電源	220 V、三相
シード燃料要素	
形式	板形
個数	32

濃縮度	$\sim 93\%$
1 個当り収収数	60
燃料板寸法	71.75 \times 2.05 \times 0.039
燃料板組成	
	ウランウミ 6.33 重量 %
	ジメチルウラン 93.67 重量 %
燃料板温度	平均 580°F
	最高 740°F
ブランケット燃料要素	
形式	ペレット型
個数	113
濃縮度	天然
1 個当り燃料棒束数	7
1 燃料棒束当り燃料棒数	120
1 燃料棒当りペレット数	26
ペレット組成	UO ₂
ペレット寸法	0.3575 \times 0.3494 in
ペレット温度	平均 1,000°F
	最高 3,800°F
核的特性表	
減速材	軽水
形式	
平均中性子温度	0.0471 eV
即発中性子寿命	5.6 $\times 10^{-5}$ 秒
実効遅発中性子発生率	0.0077
全温度係数	$-2 \times 10^{-4} / ^\circ F$
制御棒内訳	
燃料消耗	10 % $\Delta K/K$
平衡 ΔK	3.1 % $\Delta K/K$
最大 ΔK	2.9 % $\Delta K/K$
平衡 ΔK	0.7 % $\Delta K/K$
温度係数	2.6 % $\Delta K/K$
合 計	19.3 % $\Delta K/K$
熱的特性表	
冷却材	軽水
形式	
体積	全体積 70,800 l
	炉心内 2,918 l
流量	59,000 gpm*
温度	入口 507.2°F*
	出口 538.8°F*
運転圧力	2,000 psia
圧力降下	40.5 psia*
熱 流 束	
シード	平均 98,400 Btu/ft ² /hr*
	最大 418,000 Btu/ft ² /hr*
	焼却 1,350,000 Btu/ft ² /hr

* は一冷却水 4 系統のうち 3 系統を使う正常運転の値である。

ての主要部分の構造、その他原子力施設に特有な性格を持つ事がらについて、章を追ってさらにくわしく述べられる。

また表 1.1 に、PWR 計画発展の年表を、表 1.2 に PWR 発電所の特性表を掲げる。

第 2 章 PWR の一次系 (I) 原子炉

第 1 節 ま え が き

原子炉の発達には宇宙船の発達と似た点を持っている。どちらの場合もこれまでに得られている知識だけでは不十分であって、ほとんどの問題を解く場合に、多くの技術的分野にわたって最先端の研究を必要とする。

原子炉はその中に含まれる多方面にわたる技術の間の折衷によって作られる。物理学的に見て最上の設計は冶金学者や工学技術者が見た場合必ずしも最上のものではない。その上、当然設計の各段階において経済の問題を考えに入れる必要がある。たとえば原子炉の一次系の水の運転時の温度を選ぶ時に考えるべき二つの要素は、炉心と蒸気発生器の費用である。考えている範囲では、蒸気発生器の費用は温度を上げるとともに減ずるが、炉心の費用は温度とともに増加する。525°F という運転温度は両者合わせた費用が最少になる値として選ばれたものである。

この例は同時にまた新しい分野を開拓して行く場合に出合う複雑性を示している。というのは運転温度を決定した時期には、まだ炉心についても蒸気発生器についても、おおよその見積りしかできていなかったからである。事実、蒸気発生器の入札価格の間には 5 倍の開きがあった。

第 2 節 原子炉の構成要素

原子炉の設計について考察する前に、それを構成する要素とその配置について考える。原子炉は、压力容器、燃料要素、制御棒構造の 3 部に大別して考えられる。原子炉はまた計測装置を持っている。

2.1 圧 力 容 器

原子炉は図 2.1 に示すような円筒形の構造物で、炭素鋼の板と鍛造物から作られている。容器の内面は、腐食を防ぐため、約 1/4 インチの厚さに不銹鋼でおおわれている。内部の高さ約 31 フィート、円径約 9 フィート、壁の厚さは 8 インチを少し越える。γ 線によって容器壁内部で過度に熱が発生することは、熱遮蔽板によって防止される。

容器の上部と下部は半球形で、上部半球部はボルトで容器の主要部へ取り付けられる。それには、制御棒、計測装置、燃料取替えのために、46 の貫通孔がある。

2.2 制 御 棒 構 造

PWR 原子炉は中性子を吸収する制御棒を炉心に出し入れすることにより制御される。制御棒は十字形断面を持ち、燃料集合体内部に作られた同じ形の穴に合うようになっていて、棒の巾は $3\frac{3}{8}$ インチである。棒の下部はハフニウム、上部はジルコニウム合金からなる。棒のハフニウム部は中性子を吸収するための部分で、燃料集合体内の燃料の長さに相応して 70 インチほどの長さを持つ。炉心に完全に挿入した時、棒の下端が燃料合金の下端の位置と一致するようになっている。

制御棒の動作は正確でなければならない。その上「スクラム」つまり緊急時において、棒をすみやかに炉心に落すための考慮が払われていなければならない。棒の上下動は棒のねじを切っ

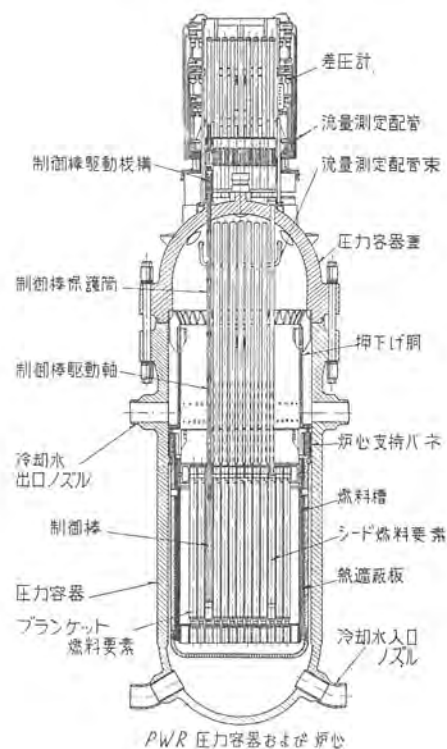


図 2.1 压力容器断面図

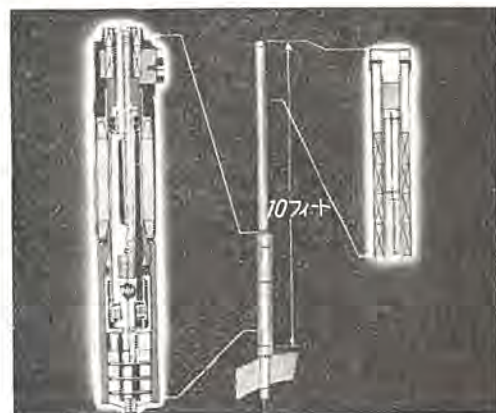


図 2.2 制御棒駆動機構

た部分に、回転ナット機構によってモータの運動を伝えることで行われる。モータはキャンド形で、回転子は密封されて制御棒と同軸に圧力管内に収められ、压力容器頭部機構内に置かれる。モータの固定子は、制御棒位置指示コイルとともに、圧力管外部に置かれる。(図 2.2)

通常はモータ回転子と制御棒の軸を連結する回転ナットは、モータ固定子への電流が断たれると、ばねの力で制御棒の軸から離れる。これがスクラムの動作で、この場合制御棒は重力によって炉心へ落下する。

固定子へ電流が送られている場合は、回転ナットによってモータ回転子の回転は制御棒の上下動に変えられる。電流が直流の場合モータは停止したがって棒はその位置に固定され、電流が交流になるとモータが回転して棒が動かされる。

2.3 炉 心

PWR 原子炉の燃料集合体には高濃縮ウランと天然ウラン酸化物の両方が用いられる。天然ウラン要素は濃縮ウラン要素か

ら漏れてくる中性子の助けをかりて連鎖反応をするよう設計されている。高濃縮ウラン要素はシードと呼ばれ、天然ウラン要素はブランケットと呼ばれる。炉心寿命の初期はシードが反応度の大部分を受持ち、ブランケットは中性子を増す反射体の役をする。

炉心の長さは約 70 インチで、145 本の燃料要素を取る。そのうち 32 本がシードで 113 本がブランケットである。各要素は $5\frac{1}{2}$ インチ角の角柱で、全体で大体 6.8 フィートの直径を持つ円筒形になる。シードとブランケットは同じ外形を持つので入れ替えることもできる。また各要素は原子炉のふたをはずさないまま原子炉から取出すことができる。

シード要素の基本部分は燃料板である。これは濃縮ウランとジルコニウムの合金板を 2 枚のジルカロイ-2 の板で両面から被覆したものである。この燃料板 15 板と 2 板の側板を間隔をおいて重ねて一つの角柱を作り、これを 4 個、適当に間隔をおいてまとめると、中に十字形断面の穴を持った 1 個のシード要素ができる。図 2.3 に示す通路に制御棒が挿入される。

ブランケット要素の基本部分は図 2.4 に示す燃料棒で、これは 26 個の酸化ウラン (UO_2) ペレットを改めたジルコニウム合金筒である。この筒は外径 $1\frac{1}{2}$ インチ弱、長さ $9\frac{1}{2}$ インチのものである。11 本×11 本にこの燃料棒が配列されて一つの燃料束を作るが、一隅は冷却材試料採取のための管を入れるためあけてあるので、結局 120 本の燃料棒で一つの燃料束が作られる。(図 2.5) 燃料束 7 個を縦に並べて外被をつけてブランケット要素が作られる。

シードとブランケットは炉心内の定まった位置に配置される。(図 2.6) さらにブランケットはシードに対する位置によって 4 群に分けられ、各部分によって熱発生が異なるので、それに対応してグループごとに冷却材流量を変えるようになっている。

2.4 原子炉計測

第 4 章に述べる制御のための計測のほかに、PWR 原子炉の炉心には将来の設計資料を得るための計測装置が収められている。それは、炉心内冷却材温度、シード温度、冷却材流量、お

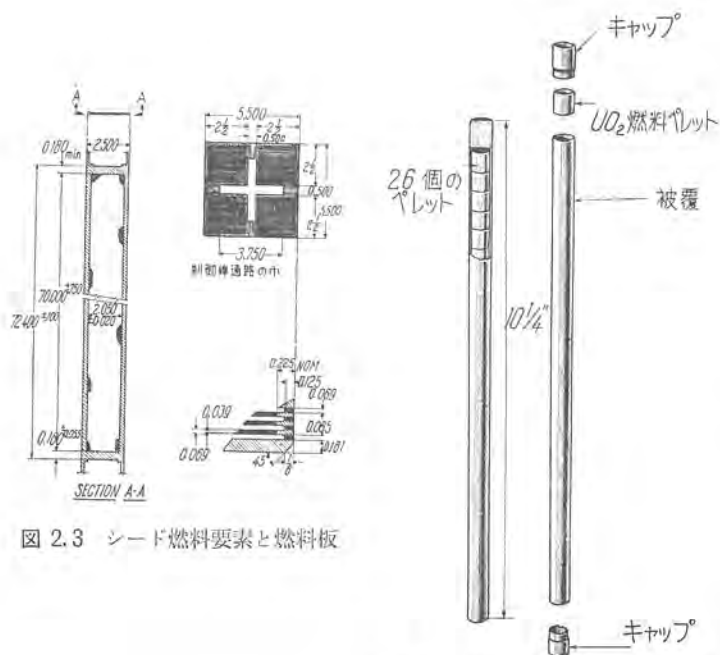


図 2.3 シード燃料要素と燃料板

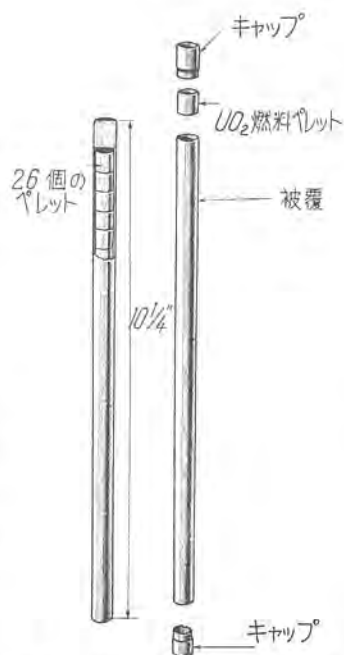


図 2.4 UO_2 ブランケット燃料棒



図 2.5 UO_2 ブランケット燃料束

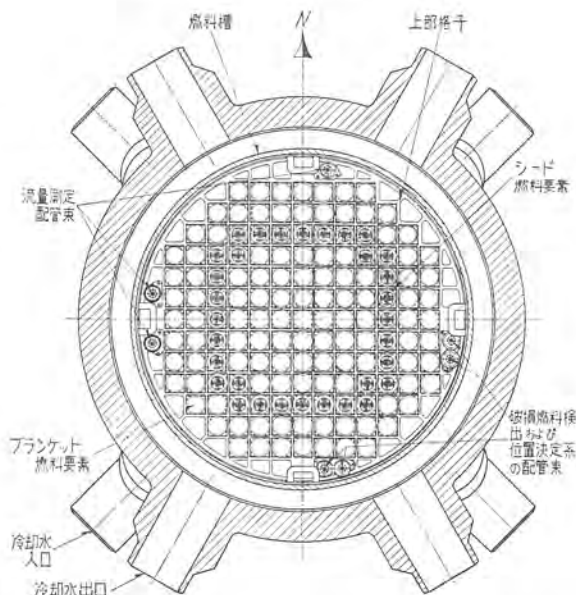


図 2.6 圧力容器断面図(炉心の上で切断したもの)

よび破損燃料の測定である。

炉心内の冷却材温度は 52 個の熱電対で測られる。このうち 5 個は炉心にはいる冷却材の温度を炉心底板の下で測り、22 個はシードの上下の温度を、25 個はブランケットを出る冷却材の温度を測る。

シード板温度を測るため、6 個のシード要素の内部の燃料板の一つにそれぞれ 6 個の熱電対が流れに沿って等間隔に取り付けられる。

流量測定装置によって、16 個のシード要素と、20 個のブランケット要素の内部を流れる冷却材の量が測定される。これは 36 個の冷却材通路につけられたノズルによる圧力差の測定によって計られる。

破損燃料要素の検出と位置決定については次章にのべる。

第 3 節 設計上の考察

3.1 炉心

この原子炉において、物理学的にもっとも興味あ

る点は、核燃料をシード部とブランケット部に分けたことであろう。将来の原子力施設に用いるべき燃料の形式についての多くの基本的知識がこの原子炉から得られるであろう。

シードとブランケットに分けるといふ考え方はいくつかの重要な特長がある。高濃縮のシードにおいては、ウラン 235 の集中によって連鎖反応が可能になるばかりでなく、そこから多量の中性子が放出される。

一方天然ウランのブランケット要素は 140 分の 1 の U^{235} を含み、残りは U^{238} である。 U^{238} は熱中性子によっては核分裂を起さないで、それを吸収する。実際 U^{238} が中性子を吸収し過ぎるので、天然ウランだけでは連鎖反応は持続しない。その理由でシード要素はブランケット要素に反応を持続するに十分なほどの中性子を供給しなければならない。しかしこれだけの理由でこういう形の炉心を用いることは実際の的でなく、別の核反応が問題になってくる。ウラン 238 は中性子を吸収するとウラン 239 になるが、これは自然崩壊によってプルトニウム 239 になる。この Pu-239 は U^{235} と同じく熱中性子原子炉の燃料として使えるものである。こうして原子炉の中で核燃料の消費にともなって新しい燃料が生産される。

消費される 1 個の原子核によって 1 個以上の分裂性原子を生産するような原子炉を特別に設計することができるし、事実設計されている。これらは増殖炉と呼ばれる。しかし、一般に炉心の体積を一定にすれば、原子炉が増殖炉として能率が良いほど、動力炉としての能率は悪くなる。しかし一方では増殖過程によって炉心の寿命が長くなることも計算に入れる必要がある。そこで PWR の炉心は両極端の妥協点を探っている。この原子炉は転換炉と呼ばれるが、その意味は、燃料使用中いくらかの新しい燃料が生産されるが、増殖炉と名づけ得るほどではないということである。実際には 10 個の U^{235} の破壊によって 6 個の Pu が生産される。すなわち転換比は 0.6 である。

この比は炉心全体に対する値である。シード部には比較的小量の U^{238} しかないので生産される Pu の量も比較的小さい。一方ブランケット部においては、ブランケット内のウランの 1 個の核分裂に対して 1.1 個の Pu が作られる。

想像されるように、この増殖効果によってブランケットはシードより寿命が長い。ブランケット要素を完全に使い切る間に、シード部を少なくとも 1 回取替えなければならない。

現在の技術的段階においては、どの原子炉においても炉心の寿命を正確に予想することはできない。しかし PWR の炉心のブランケットは最少に見積って全出力 8,000 時間、シードは同じく最少 3,000 時間の寿命を持つように設計されている。

炉心が新しいうちは、出力の半分はシード要素によって、半分はブランケットによって発生する。しかしシード内の U^{235} が消費されるにつれてその熱発生能力は減少し、一方ブランケット内では消費される以上の新しい燃料が生産される。そこでブランケット内で発生する出力の比率は次第に増加するはずである。

しかしシードとブランケットの間の出力の比率は炉の温度と制御棒の位置によってきまるので、最後の出力の比率は原子炉の使い方によって左右される。

炉内に残った U^{235} または Pu の量が一定値以下になると反応は止まる。この時にもまだいくらかの核燃料が残っているが臨界状態を持続するには不足になるのである。しかしこれは再処理して役立てることができるのでむだになるわけではない。

炉心の寿命に関係する他の要素は原子炉内の核的毒作用である。分裂生成物のある物、とくにセシウムは中性子を吸収する。運転の初期の間はこれらの量は比較的小量であって影響は小さいが、運転中次第に蓄積してついには核反応を止める。すなわち、連鎖反応を止めるほど多くの中性子を分裂生成物が吸収するようになる。こうなると、分裂性燃料がまだ残っていても、燃料の入れ替えをしなければならない。

幸いなことにセシウムの毒作用は平衡値に達する。セシウムの特別の同位元素 ($Xe-135$) は直接の分裂生成物 $Te-135$ から崩壊によって作られるが、これも安定でなく最後には Ce になる。そこで炉心の寿命中のある時期になると、生成するセシウムと崩壊するセシウムの量が等しくなると、セシウムの量が平衡に達する。制御棒の調整によってこの作用に打ち勝つことができる。しかし他の有害な分裂性物質は蓄積して行くので最後には連鎖反応が止められる。

3.2 制 御

原子炉の制御はハフニウムの制御棒で行われる。しかし負の温度係数によって炉の制御が簡単になるよう設計されている。

緊急状態を除いては、制御棒のおもな機能は原子炉の出力状態を保持することである。運転の初期には、恐らく 12本の制御棒を完全に炉内に入れたまま全出力状態になる。平衡セシウムに打ち勝つためにはさらに 4本を引抜かなければならない。燃料が消耗し分裂生成物が蓄積するにつれて残りの制御棒が 4本 1組で引き上げられて行く。

炉心寿命の各時期によって定まった制御棒の運転位置がある。この位置は原子炉に要求されている出力にかかわらず保持される。そして要求される熱的状态に応じた数の中性子によって連鎖反応が持続される。

負の温度係数を利用することによって、正常運転中はたいいてい出力変化に対しては制御棒を動かす必要がない。たとえば発電機に対する出力要求が増したとすると、これはタービンに大きな出力を要求することになり、蒸気流量を増すことが要求される。蒸気流量を増すことによって二次系の圧力が下がりその結果二次系の温度が下がる。それによってより多くの熱が熱交換器において一次冷却水から奪われることになり、蒸気発生器を出る一次冷却水の温度が前より低くなる。以前より低温の水が原子炉に達すると、原子炉の熱発生状態が自動的に上がって、原子炉を出る一次冷却水の温度が以前より高くなる。適当な設計によって、増加した出力要求に見合うだけの熱が、自動的に原子炉から一次冷却水に与えられるようにすることができる。

実際にこの発電炉は一次冷却水の平均温度を一定に保つよう設計されている。そこで、もし何かの理由で原子炉入口の水温が下がると、逆に出口の水温はそれだけ上がり、したがってより多くの熱が一次冷却水に与えられる。運転においては、定格全出力の 10% 程度の負荷変動は制御棒を使わずに負の温度係数の効果によって処理される。

3.3 材 料

材料の問題は原子炉設計においてもっとも重要な問題の一つである。一次冷却水に接する材料は特異な性質を持っていなければならない。高温水の強い腐食作用に耐えるばかりでなく、それは核的性質が良くなければならない。

原子炉内に用いられる構造材料に要求される基礎的条件は、核分裂過程を妨げないこと、必要な期間放射線に耐えること、

高温水内で腐食を受けないことである。残念なことに、これらの要求を満たす材料は少ししか存在しない。

現在のところ、炉心の構造材料としてはジルコニウムが最上のものである。それは 600°F から 700°F の水中でよく腐食に耐え、中性子を吸収することが少ない。ジルカロイ 2 と呼ばれるジルコニウム合金が広範囲に PWR に用いられている。

強い放射性を持つ物質を原子炉から逃さないためには、耐食性が特に重要である。とくに燃料を高温水から守ることは大切であって、それはもし分裂生成物が一次冷却水中に漏れると全一次系を汚すことになるからである。

ブランケット燃料には他の材料上の問題があり、いくつかの矛盾する問題を解かなければならない。核的にいえば酸化物や合金ではない純粋のウランがもっとも良い。しかし金属ウランは放射線によって変形する。またジルコニウムの筒に欠陥があることも考えられるので、燃料自身も良い耐食性を持たなければならない。これらの理由で酸化ウランがブランケット燃料として選ばれた。最終的にはウラン合金が最上と思われるが、まだ達成されていない。

材料問題の他の例はハフニウムの制御棒である。制御棒の材料はまず第一によく中性子を吸収するものでなければならない。しかし同時によく腐食に耐え、強い放射線を受ける運転状態において変形しないものでなくてはならない。ハフニウムはよい材料であるが、ジルコニウムと同じく高価である。実際、それはジルコニウム生産の一部として生産されているが、しかしこの方法では工業上の要求を満たすほどは生産されず値段も高い。

この最初の大形施設は安全にかつ機械的に完全に設計されなければならないということからも材料の問題が出てくる。ある故障が実際に起らないようにするためには、各種の機械の故障の比重を注意深く調べる必要がある。故障が起る可能性が避けられない場合には、最悪の場合を計算して、事故が安全に処理されることを確めなければならない。これらすべては各種の材料の問題にもどってくる。

材料に関する一つの事実を述べておかなければならない。PWR は設計を終えなければならない時までには得られたもっとも良い資料を基にして設計されている。材料問題のいくつかはノーチラスの経験によって部分的に解かれていたし、いくつかの問題は PWR 計画に間に合うよう解決することができた。もっとも良い核的材料があることは疑いないし、材料に関してこの原子炉に取付けられている安全対策には不用のものが多くと思われるが、これらはすべて広範囲で時を要する研究にまたなければならない。一例として、もしジルコニウムの代りにアルミニウム合金のようなものが使えればジルコニウム要素に支払われている費用の 80% を節約することができると見積られている。

現在のところ、不銹鋼がもっとも信頼できる材料であって、原子炉および関連する部分では不銹鋼で作る必要がある。在来の施設では、水に化合物を加えて腐食を抑えることができるので、もっと安い鋼が使われている。ところが原子炉においてはこれらの化合物は放射線によって分解してしまう。原子炉を炭素鋼で作るにはどうすればよいかという問題は活発に研究されている。しかし、PWR 原子炉に取っては不銹鋼が唯一の解答であった。不銹鋼を使用することによる価格の開きは、原子炉系の価格の少なくとも 10% になっている。

すでに述べたように、PWR 発電所の原子炉は多くの技術的、経済的問題の妥協によって作られている。これはそれ以前の原

子炉によって蓄積された加圧水形原子炉に関するすべての知識を十分に利用している。将来の原子炉はさらによく、さらに経済的になるだろうが、それはこの開発によって得られた技術によるといってよいだろう。

第 3 章 PWR の一次系 (II) 一次冷却水系

第 1 節 ま え が き

原子炉は原子力施設のもっとも重要な部分であるが、実際には核分裂から有効な動力を取り出すための第一段階に過ぎない。一次系には他に冷却水を駆動し、浄化し、一定圧力に保ち、それを蒸気発生器へ送って炉心で発生した熱を二次系に移すための構成要素が必要である。

一次系の主要部分は原子炉を除いては、蒸気発生器とキャンドモータポンプと弁類である。

しかし一次系には、加圧系、弁操作系、純水系のような多くの補助系が含まれている。

第 2 節 蒸 気 発 生 器

4 個の一次冷却水系にはそれぞれ蒸気発生器が 1 個ずつ設けられている。このうち 2 個は貫流形蒸気発生器であり、他の 2 個は U 字形である。

いずれの蒸気発生器も 3 個の部分から成っている。すなわち、管内の一次冷却水がその回りの二次系の水に熱を与える熱交換器部分、タービンへ送る蒸気を乾燥したものにすする蒸気ドラムと、昇水管、降水管よりなる配管部分である。またその定格出力はそれぞれ設計出力、蒸気圧力 600 psia において、毎時 263×10^6 Btu の熱を発生するようになっている。

貫流形熱交換器は全不銹鋼製で、一次冷却水は直径 1/2 インチ長さ 36 フィートの 2,096 本の管を流れる。これらの管は両端で端板に溶接され、直径 43 インチの熱交換器殻へ収められる。蒸気ドラムは二次系の水と蒸気に接するだけであるから炭素鋼で作られている。12 本の 8 インチ昇水管と 6 本の 8 インチ降水管が両者の間を結んでいる。

U 字形熱交換器では一次冷却水は 921 本の直径 3/4 インチの不銹鋼の管を流れる。これらの管の長さは平均 50 フィートで U 字形に曲げられて、直径 38 インチの U 形殻に収められている。貫流形のものとは違って、殻の両端部と、管束をささえる端板の一次系水に接する部分は、不銹鋼で被覆した炭素鋼で作られている。蒸気ドラムは在来の設計で、14 本の 4 インチ降水管と 18 本の 5 インチ昇水管が両者を連結する。

第 3 節 キャンドモータポンプ

冷却水は各系統ごとに 1 個のキャンドモータポンプによって一次系を循環する。これらのポンプは漏れがないような設計になっている。入力 1,400 kW の単巻二速モータによって一段 18,300 gpm の遠心ポンプが駆動される。両速度とも動力は三相、60 サイクル、2,300 ボルトである。

ポンプの回転子と固定子は、いずれも系の全圧力に耐えるよう設計された容器に収められている。一次系の水が回転子と固定子の間まではいつてくるが、モータはポンプと一体になっているので、インペラとモータの間を密封する必要はない。一次系の他の部分と同様に、高温の一次系冷却水によって回転子の潤滑をしなければならないので、過熱を防ぐため固定子外部は

コイルによって冷却されている。

第4節 一次系統弁

図3.1に示すように各一次系統には3種類の弁がある。主塞止弁は原子炉コンテナ内にあり、1個は原子炉の一次系水入口側に1個は出口側にある。炉運転中はこれらの弁に近づくことができないので、遠隔操作をする必要があり、また高度の信頼性を要求されている。圧力が高いことと保守の問題のため、

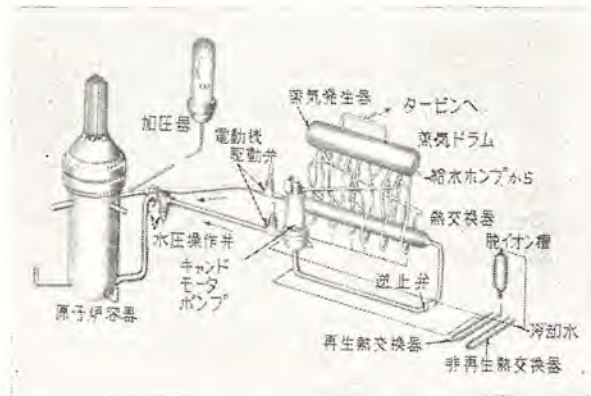


図 3.1 一次冷却水系

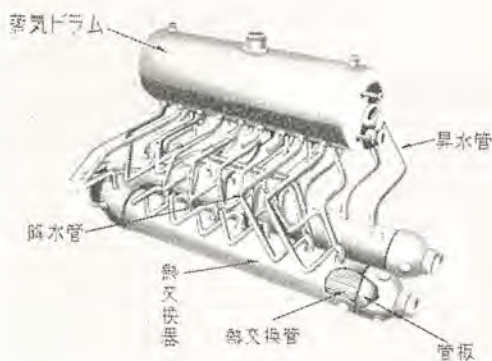


図 3.2 U 形蒸気発生器

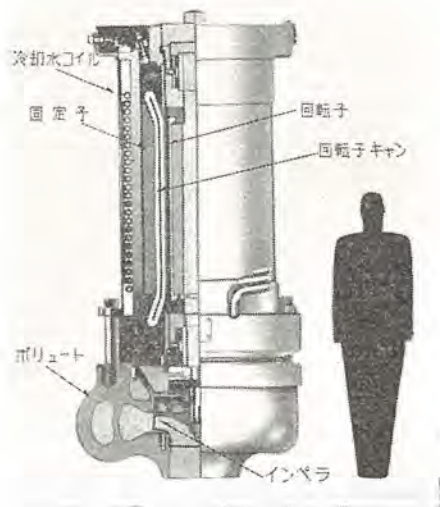


図 3.3 一次冷却水駆動ポンプ

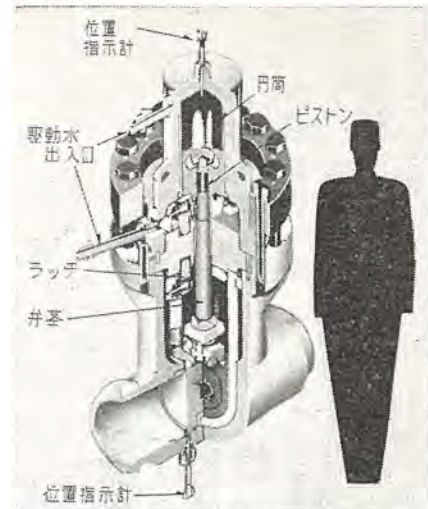


図 3.4 主塞止弁

ベローやバックンで密封することができないので、水圧シリンダ弁が用いられている。これらのバルブを主制御室から遠隔操作することによって、4系統の一次冷却水系をそれぞれ他から分離することができる。

安全のため主塞止弁はそれぞれボイラ室内にあるモータ操作のゲート弁によって補助される。この弁はその系統の一部を修理する時にだけ用いられる。修理にかかる前に、弁にモータ装置を取付けて主弁を局部的に閉鎖して、修理員を主塞止弁の事故による開放の危険から守る。

これらの塞止弁の外に、各系統には逆止弁が設けられている。この弁の機能は、ポンプが何らかの理由で止まった時に過大な逆流を阻止することである。この弁は正常な流れに対しては小さな流速においてもあまり抵抗にならないよう設計されている。

第5節 補助系統

原子炉プラントの運転は少数の主要部分だけによって、行われるのではなく、その他にも重要で欠くことのできない作用をする部分が多数ある。いわゆる補助系統によって行われる機能はさまざまである。表面的には、圧力リリーフとか水の浄化など、別に格別の問題ではないように思われるかも知れないが、原子力の系であることによって機能が変わるので、本質的に新しい問題として取り上げる価値が十分ある。

5.1 加圧系および圧力リリーフ系

一次系では沸騰を起さないようにすることが重要なので、正常運転時の系の圧力は、急激な出力変化の場合にも、狭い変動範囲内に保たなければならない。これが加圧系の機能である。(図3.5, 3.6) 圧力リリーフ系は、とくに大きな出力変動の際に系の圧力が過大になることを防ぐためのものである。

加圧系の主要部分は加圧タンクで、これは原子炉出口近くで一次系に管で連結されている。正常運転中は260立方フィートの容積の中に100立方フィートの水が収められる。水中に浸された電熱器によって、タンク内を2,000 psiaの蒸気圧に保つための熱が供給される。

正常な出力変動に対しては、一次系の圧力をかなり一様に保つように加圧器は設計されている。たとえば何かの理由で一次系の圧力が下がると、加圧器内の圧力が下がるのでその中の水の一部が蒸発し、それが器内の蒸気に加わるので一次系の圧力



図 3.5 加圧器

の減少が押えられる。

圧力が正常範囲をこえると、加圧器頂部の噴霧筒が働き始める。これは一次冷却水をタンク上部の蒸気内へ噴出するので、蒸気の一部が凝結し、したがって系の圧力が下がる。

正常な場合 SHIPPING PORT 発電所に要求される出力変動は、ステップ変動としては +15 MW または -12 MW、毎秒 3 MW の時 ±15 MW、毎分 25 MW の時 ±20 MW である。これらの条件に対して、加圧系によって一次系の圧力は 1,850 psia から 2,180 psia の範囲内に保たれる。

加圧器はそれ自身の働きで始動の際の系の圧力を保持することはできない。というのは室温から運転温度までの温度変化に対する一次系水の体積変化を吸収することができないからである。そこでその間に約 400 立方フィートの一次冷却水を一次系から排出する必要がある。

すでに述べたように、加圧器は正常な出力要求にともなう変動は処理することができるが、出力が急に消失したり、ポンプが急に止まるという事故を想定すると、こういう場合、一次系に過剰な熱が与えられて温度が過度に上昇する。しかも急激で大きな増加である。この万一の場合に備えて圧力リリーフ系が設けられている（図 3.7）。圧力リリーフ装置は圧力容器、加圧器、および 4 個の各一次冷却回路といった弁で切離すことのできる部分にはすべて設けられている。

これらのリリーフ弁の圧力設定は、回復に対する信頼性の高いものほど低い圧力で動作するようにしてある。加圧器の 2 個の弁は蒸気を通すのもっとも低い値に設定してある。すなわちパイロット弁は 2,175 psig、自動操作弁は 2,260 psig で動作する。圧力容器の自動操作弁は 2,450 psig で動作し、各回路のリリーフ弁は 2,830 psig で動作する。これらの弁から吐き出される水は吹き出しタンクへ導かれるので、コンテナが放射性の水で汚れる恐れはない。

5.2 純水系

一次冷却水の中へ核分裂生成物や腐食生成物が漏れ出ないような注意が一次系には払われているが、完全を期待することはできない。

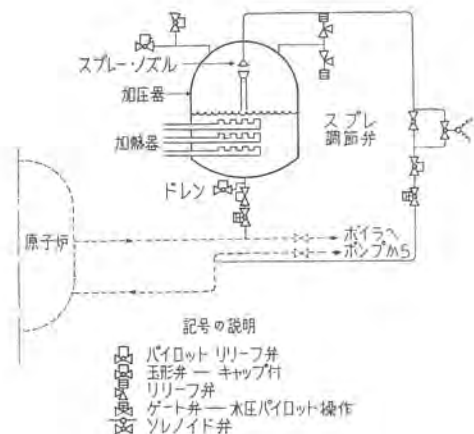


図 3.6 加圧器

不純物は次の理由で微小に押えられなければならない。第一に放射線防護の面から一次系の放射線量は一定値以下に制限されなければならない。第二に伝熱面に不純物が沈殿すると熱的特性が変化する。第三にある部分で生成された粒子が炉心やその他の部分の細い通路をふさぐことが考えられる。

純水系は同形のものの 2 回路からなっている。1 回路が一次系の 2 回路を受持つが、その方法は 2 本の一次系回路の 1 本から一次冷却水を抽出して処理し、それをどちらかの一次系回路にもどす。全原子炉系の浄化に必要な能力を 1 本の純水系が持っているため、必要な場合 1 本で全冷却水を処理することもできる。

純水系の主要部分は脱イオン槽、再生式熱交換器、および非再生式熱交換器である。熱交換器の機能は、脱イオン槽の樹脂を痛めないように、508°F の一次冷却水を 120°F まで下げることと、処理の後で一次系にもどす時に再び 435°F まで上げることである。再加熱してもどすことは熱の損失を少なくし原子炉回路への熱衝撃を減らす。

原子炉冷却水は絶えず少しずつ純水系に分流するようになっている。一次系から抽出された水は、再生式および非再生式の熱交換器、脱イオン槽を通り、再生式熱交換器の胴側で加熱されて一次系へもどる。

5.3 一次冷却水抽出およびベント系

一次系内から放出される放射性の液体および気体はすべて注意深く集められて廃棄物処理系へ送らなければならない。これが一次冷却水抽出およびベント系の機能である。この系は放射性の液体および気体を放出するすべての部分と連結している必要がある。さらにこの系は放出物の温度と圧力を下げる機能とそれを安全に廃棄物処理系へ送り込むようになっていなければならない。

この系は吹き出しタンクとフラッシュタンクからなる。フラッシュタンクは原子炉系からのドレンを冷却し圧力を下す。吹き出しタンクは各種の圧力リリーフ弁から放出される原子炉冷却水およびその蒸気をすべて収容するよう設計されている。（図 3.7）

この系のその他の機能は、起動中に生ずる一次冷却水の過剰分を抽出すること、加圧器内の液面を一定に保つこと、および分離された一次系回路の水を抜き取ることである。

5.4 崩壊熱除去系

補助系の中には特別な事故に対処するために設計されている

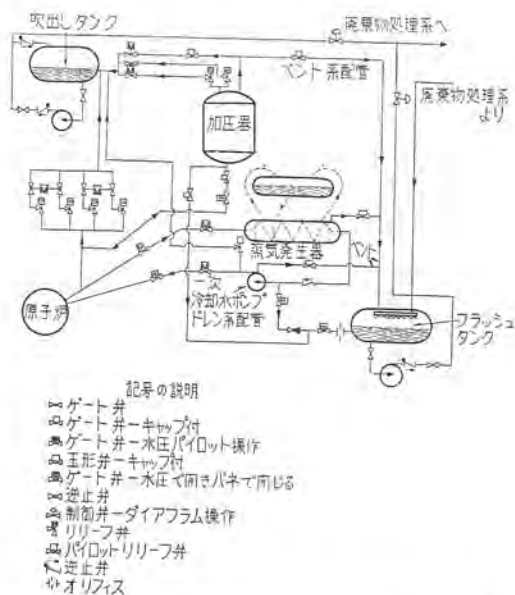


図 3.7 圧力リリーフ系および一次冷却水抽出ペント系

ものがある。たとえば一次冷却系ポンプの交流電源が急に失われたとする。この場合原子炉はすぐ停止させられるが、原子炉内には多量の熱が残っている。一次冷却水の流れが止まると炉心が破損する恐れがある。この場合炉心の冷却は崩壊熱除去系によって処理される。この系の主要部分は二次系に設けられた蒸気リリーフ弁で、707 psia で動作し 7,000 kW の熱を除去する。この弁は通常は分離されているが、一次冷却水ポンプすべての交流電源が失われると自動的に動作する。

一次冷却水回路内に自然対流が起り、熱は蒸気発生器によって除かれ、発生した蒸気は蒸気リリーフ弁で放出される。この弁は十分早く動作するようになっているので、一次系および二次系他のリリーフ弁がこの事故で動作することが防がれる。

5.5 破損燃料検出および位置決定系

この PWR 発電所の第一の目的は将来の原子炉技術のための資料を得ることである。多くの補助系および計測装置がこの目的のため設けられている。その一つとして破損ブランケット燃料要素の検出のための系が設計されている。

板状燃料要素についてはかなりの経験が得られているが、ブランケットに用いられた燃料の形、すなわち酸化ウランのペレットをジルコニウム管に収めたものについては比較的わずかの経験しか得られていない。この理由でブランケット燃料要素だけを監視することになった。

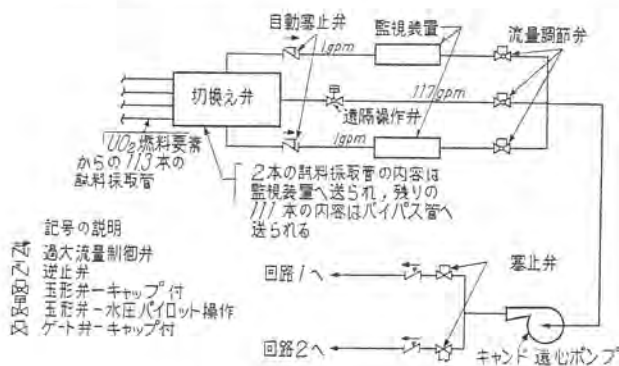


図 3.8 破損燃料検出および位置決定系

破損燃料は一次冷却水中に遅発中性子が存在することで検出される。各試料採取管が113本のブランケット要素の部分から一次冷却水を抽出する。この試料は圧力容器頂部に取り付けた切替弁を通る。この弁によって113本のうち52本からの試料は監視装置へ導かれる。(図 3.8) 残りの試料はバイパス管を通る。順に2本ずつの試料が同時に調べられて、この操作が繰り返えされて行く。

ある試料中の遅発中性子放出のレベルによって破損燃料要素が検出されると、その燃料要素の位置を示す信号が制御室に送られる。

最初は基礎実験によって5ミル程度の破損まで検出できるものと思われていたが、PWR に用いられたジルコニウムに少量のウランが含まれていることがわかったので、検出能力が落ちて、大きな破損しか位置決定ができないことがわかった。しかしこれでも有用な感度であって、これによって原子炉技術に関する資料がさらにいくらか得られることになる。現在ジルコニウムに含まれるウランの量を制限する努力が払われている。

5.6 その他の補助系

一次冷却水の純水系に対する二重の監視のため、別に一次冷却水試料採取系が設けられている。試料は純水系の脱イオン槽の出口側と入口側から採られる。この系のもう一つの機能は化合物添加系の操作に必要な資料を得ることである。この添加系の作用によって一次冷却水に含まれる酸素量が一定値以下に保たれる。最初の臨界以下での起動の間の酸素含有量を規定値(0.14 ppm)以下にするためヒドラジンが添加され、運転中は、炉内での水の分解によって生ずる酸素と結合させるため水素ガスが加えられる。また水の pH を正常値 10 に保つため水酸化リチウムが加えられる。

これらの機能の外に、化合物添加系は原子炉を化学的に停止させるよう硼酸を一次系内に注入する働きを持つ。もし数本の制御棒が炉心外に出て動かなくなったような場合、正常な運転状態を保つ上には支障がなくとも、炉を冷たい臨界未満状態まで下げることができないということが起りうる。この場合硼酸が一次冷却水の中へ注がれることになる。もちろんこの方法は正常な制御棒の挿入ができない場合にだけ用いられる。

一次冷却水注入系は、その名の示すとおり、運転に先だって一次系に水を満たすのに用いられるが、また停止後に一次系を洗い流すのにも用いられる。

その他の重要な補助系としては安全注入系と呼ばれるものがあって、運転中に注入系では間に合わないほど速く冷却水が漏れて行くという事故が起った場合に、炉心を冷却して融解を防ぐよう設計された系統である。(図 3.9)

以上述べたことから知られるように、原子炉系は補助系も含めて最大の安全および資料が得られるように設計されている。いくつかの補助系は、ほとんど確実に、将来の原子炉施設では必要とされないものである。この施設の構成要素およびその機能を検討すれば、将来の施設で省略または簡易化されと思われる部分を比較的容易に指摘することができる。しかし SHIPPING PORT 発電所の建設および運転によって、はじめて設計変更の可能性と安全性が十分に証拠づけられるのである。

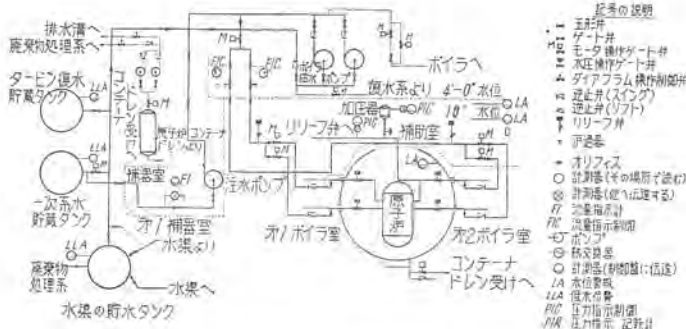


図 3.9 安全注入系

第 4 章 原子炉制御系

第 1 節 ま え が き

通常の制御系と同様に PWR の一次系の制御系は二つの基本的な部分、すなわち現在存在する条件を指示する計測系と計測系からの信号に応答し、適当な条件を維持または回復する制御系とからなっている。

この発電所の計測は発電所建設の目的から期待されるように非常に広範囲にわたって行われる。その大部分は将来の同様な原子炉の設計に役立つために付けられたものであって、残るわずかのものが直接原子炉系の制御に用いられるにすぎない。

原子炉は負の温度係数をもっているため負荷の変化に対する応動は本質的には他からの制御がなくても行うことができる。これは原子炉の制御系が不必要であることを意味するものではないが、この性質のため原子炉制御の問題はきわめて簡単になる。

通常運転時は制御棒は主として分裂生成物の蓄積の効果による一次冷却水温度の変化を較正するのに用いられる。制御棒はまた異常に大きな負荷の増減の際負の温度係数を助けて一次冷却水の温度、圧力をすみやかに通常の運転条件にもどす働きをする。この際一次系の温度、圧力がもとの状態にかえると制御棒もまた最初の位置にもどる。

第 2 節 制御系の機能

デュケン電力会社の系統の運転に関する要求が PWR 発電所の設計に際し強くとり入れられた。さらに重要な設計に対する要求は適当に短い時間に発電所を起動あるいは停止できること、発電所機能の限界内で通常のおよび異常な電力系統の過渡的状態に応動できることであった。また発電所は事故に際してもみずからを防護することができるものでなければならない。ここにいう事故とは負荷の完全な喪失、補助動力の完全な喪失、機器の故障や運転員の誤操作、あるいは一次循環系の故障による冷却水流量の減少による原子炉熱出力の急激な変化などである。

さらに詳細に述べると、原子炉系の制御はいくつかの異なる機能を果たすよう設計されている。それは高温あるいは常温のいずれにおいても原子炉を手動で起動できなければならない。原子炉出力の手動による調節もできなければならない。それは定格出力の 10% 以下の出力レベルのとき、温度、圧力が通常の運転条件以下のときには手動による運転が行われるからである。制御系は定格出力の 10% 以上で、かつ定格の運転温度、圧力で自動あるいは手動の制御が可能でなければならない。

さらに制御系は二つの異なる状況の下で運転を停止することができなければならない。第一に通常の条件下で系を停止し、すべての機器の崩壊熱による損傷を防護できなければならない。第二にもし運転を継続すれば機器に損傷を与えるような条件下で炉を自動的に停止することができなければならない。最後に制御系は一次冷却系の補助液体系もすべて制御する。

これらの機能を果たすためには系の条件に関する情報が迅速、正確かつ大部分は連続的に与えられなければならない。計測系は原子炉の反応度レベル、一次冷却水の圧力、温度、流量などを制御系に伝える。

制御系はまた全体として原子炉系のすべての重要な動作を監視することができなければならない。また運転員に条件を指示し、あるいは自動的に動作し、またある場合にはめんどろな事態を生ずることにたいする警報を与えなければならない。

第 3 節 原子炉制御系

原子炉制御系は数種類の装置からなっている。原子炉自身の反応度の条件は核計測装置により計測される。これは中性子束を測定する中性子検出器およびこれからの信号を出力レベルおよびその変化率に変換する系からなる。

中性子検出器は原子炉の中性子遮蔽の役をする中性子遮蔽タンクの水の中におかれる。中性子検出器は三つ使用され、炉心の各部分からの中性子を検出する。

この系からの情報は主制御盤、自動制御系および安全系に与えられる。この核計測装置のほかに炉心内の条件を測定する装置があるが、これは情報を与えるだけで制御には用いられない。炉心の温度はシード燃料要素につけられた熱電対により測定される。また炉心内の流量は差圧計によりシードおよびブランク燃料要素で測定される。これらは炉心内の温度分布および流量に関して有用な情報を与えるよう配置されている。この情報は記録され、炉心の設計計算に対する資料を提供する。

原子炉系の計測装置は一次系の条件に関するすべての必要な情報を与える。図 4.1 に示すように温度、圧力、圧力損失および流量がすべて系の各部分で測定され、その情報は必要な指示計、記録計または制御系に伝達される。

原子炉制御系は制御棒を制御する系と原子炉の出力および温度制御との二つの基本的な部分からなっている。制御棒制御系は反応度要求の信号を制御棒の運動に転換し、また信号のない場合には棒を定常な位置に保持する。制御棒は制御盤から手動で制御することができ、また出力および温度制御系、原子炉安全系により自動的に動作することができる。

すでに述べたように 32 本の制御棒の中 12 本は運転中炉心に完全に挿入されている。これら 12 本はいわゆる余剰反応度を抑制するためのもので Xe 蓄積の効果および燃料の消耗を打ち消すために必要な場合にだけ引き抜かれる。

制御棒操作計画では制御棒の動作は一度に 4 本に限定することになっている。異なる歯車比を使ってそれらは 1 インチまたは 3 インチごとに区切って動かされる。各制御棒は平均約 1% の反応度を持っている。制御棒の通常速度は 11"/min である。スクラムの場合にはもちろんこれらは炉心中に完全に落下する。

出力および温度制御は一次冷却材の温度および核的な出力レ

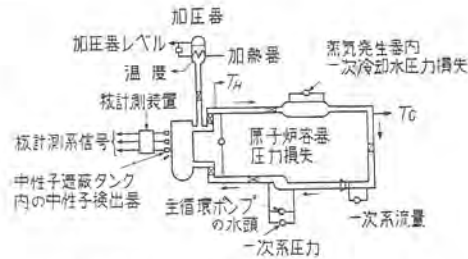


図 4.1 一次系回路の主要な計測



図 4.3 PWR 発電所の主制御室

計測装置の信号の行く先

TH—原子炉出口温度	3 原子炉出力および温度制御系
1 主制御盤—指示記録計	4 核計測装置—記録計および指示計
2 主計測盤—記録計	原子炉圧力
3 補助計測盤—指示計	1 主制御盤—指示計
4 原子炉出力および温度制御系	2 原子炉安全系
5 原子炉安全系 (高温信号)	3 表示器—警報
6 主計測盤の表示器 (高温警報)	加圧器圧力
TC—蒸気発生器出口温度	1 主制御盤—指示記録計 (狭い領域)
1 主制御盤—指示記録計	2 主計測盤—指示記録計 (広い領域)
2 主計測盤—記録計	3 原子炉安全系
3 補助計測盤—指示計	4 指示器—警報
4 原子炉出力および温度制御系	5 圧力制御
一次系流量	加圧器レベル
1 主制御盤—指示計	1 主制御盤—指示記録計 (狭い領域)
2 表示器—流量減少警報	2 主計測盤—指示記録計 (広い領域)
一次系圧力	3 加熱器制御
1 主制御盤—指示計	4 表示器—警報
主循環ポンプ水頭	加圧器温度
1 主計測盤—指示計	1 主制御盤—指示計
蒸気発生器内一次冷却水圧力損失	2 主計測盤—記録計
1 主計測盤—指示計	3 加熱器制御
原子炉容器内圧力損失	
1 主計測盤—指示計	
核計測系信号	
1 主制御盤	
2 原子炉安全系	

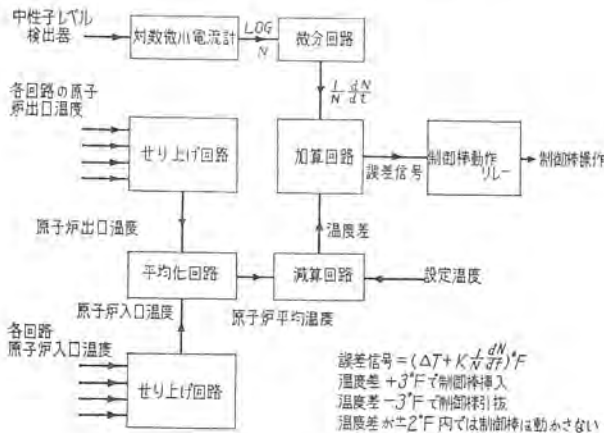


図 4.2 原子炉出力および温度制御系

ベルに関する情報を受け、冷却材の平均温度を一定に保つように作用する。この系の系統図を図 4.2 に示す。この制御系はつねに一次系を監視するが、Xe-135 の濃度変化による場合を除くたいの条件の下では原子炉の負の温度係数だけで定常状態において一次冷却材の平均温度を一定に保つに十分である。出力レベルに大きな変化が起った場合には出力および温度制御系が制御棒の動作に必要な信号を出す。Xe-135 の濃度変化が原子炉が自己調節している温度変化をきたす時にもまた制御棒は動作する。

原子炉系の制御には一次系およびその補助系の手動および自動操作が含まれている。弁の操作、ポンプの運転および加圧器

のスプレ、加熱器動作の制御はこれに含まれる。

原子炉安全系は炉心の損傷を防ぐためのもので、さし迫った条件の緊急さに応じ制御棒の (通常速度での) 挿入またはスクラムを行う。これらの条件に対して安全系は警報を鳴らす。この系にはまた動作してない一次冷却回路から炉心に冷たい水が急激に流入するのを防ぐための鎖錠がある。

原子炉系の監視系は放射線監視系とテレビ監視装置との二つからなっている。放射線監視系は数個の機能をもっている。それはいろんな仕切りの中の放射線レベルを測定し、原子炉系内を従業員が移動することができるように情報を与え、また一次冷却系の欠陥がある場合にはそれを運転員に警告する。放射線監視系はまた廃棄物処理系の監視を行う。その他発電所用地の周囲の放射能のデータを集める。

テレビ監視装置は二つの所内用テレビ系からなり、蒸気コンテナ内の条件を監視する。そのうち一つの系は原子炉運転中接近できない領域を見ることができ、他の一つの系は蒸気発生器のゲージガラスを見ることができる。

制御系の中心はもちろん主制御室である。(図 4.3 参照) 主制御盤は組織的に配置されており、原子炉から送電線に至るすべての重要な要素は制御盤に設置されている。

第 4 節 制御の方針

すでに述べたように原子炉系は冷却材の平均温度を一定にするよう設計されている。原子炉出力はそのもつ負の温度係数のために実質的には他から制御してやらなくても自動的に自己制御する。Xe の毒作用、燃料の消耗がなければ制御棒は起動、出力レベルの調節、停止のときだけ必要となるであろう。しかし実際には Xe の毒作用は負荷変動中平均温度の動揺を惹起し、そのため制御棒の操作が必要となる。制御棒の動作は平均温度が設定値の $\pm 3^\circ\text{F}$ をこえたとき開始され、 $\pm 2^\circ\text{F}$ 以下になると停止する。制御棒動作の行過ぎあるいは振動を妨げるために制御には減衰効果を取り入れられてある。この効果は中性子検出器のほうから次に述べる方法で達せられる。

原子炉の出力および温度制御系の特長の中のあるものはとくに興味がある。この系は原子炉の状態を検出し、評価し、制御動作がとられるべきかまたは反応度の負の温度係数だけで十分であるかを決定し、次いで動作を開始する。この系のブロック線図を図 4.2 に示す。

制御系は中性子検出器および一次系の原子炉の出入口の温度計から情報を受ける。中性子検出器からの情報は出力レベルの変化率を示す信号に変えられて、加算回路に送られる。同時に四つのループの最高平均温度が測定され、設定温度と比較し、誤差信号が加算回路に送られる。

これらの出力および温度信号が加算回路に送られ、誤差信号

がリレーの系統に送られる。信号を受けたりレーの系は制御棒駆動機構に、制御棒を挿入するか、引き抜くか、動かさないでよいかの信号を送る。図 4.2 のブロック線図および上に述べたことにより、出力および温度制御系は温度の偏差が 3°F 以上になったとき待機の設定をする。それは中性子束の変化率がさらに必要な補正を行うからである。

出力および温度制御系で興味ある特長はせり上げ回路である。まず各冷却回路の原子炉入口および出口温度が測定され、すべての入口温度は一つのせり上げ回路に送られ、またすべての出口温度は他の一つのせり上げ回路に送られる。各せり上げ回路はそれぞれが受けた温度指示のうち最高のものを選択し、これら二つのせり上げ回路からの信号は平均回路に送られて一次冷却材の平均温度を計算し制御系に送られる。

各せり上げ回路がその受ける四つの温度のうち最高のものを選出することにより系の望ましくない誤動作を妨げることができる。もし各冷却回路の出入口温度を測定して、単純に平均を取ると、そのいずれかの温度計が故障により実際より低い温度の読みを制御系に送ると、炉の冷却材の平均温度は実際よりも低く計算され、制御棒の引抜き、原子炉出力の増加をきたすことになるであろう。せり上げ回路は四つの冷却回路の各測定値のうち最高のものを選ぶから、もしどれかが故障して実際よりも低い温度を指示してもこの信号は無視される。ただこの回路を使用するときはどれかの温度計が故障により実際より高い温度を示すときは平均温度は実際より高く計算され、制御棒の挿入、炉出力の低下をきたすがこれは安全性の面からはさしつかえない。

せり上げ回路のこの例からもわかるように制御系はすべて可能な限り“fail-safe”（故障の結果は安全側に働く）になっている。故障が系の動作または表示により運転員に指示されないときにも、8 時間交代のときの巡視により発見されるであろう。

せり上げ方式は同じ性質のいくつかの信号がとられる場合にも用いられ、原子炉系に最大の危険をもたらすことを示す信号を選択する。このような方法あるいは他の方法により、安全で信頼性のある運転が確保される。

第 5 節 アナログ計算器による解析

制御系の効果については広範囲の研究が計算器を用いて行われた。全体の系をアナログ計算器で表わし、種々の運転条件が入れられた。その結果を図 4.4 に示す。

図 4.4 (a) の曲線は通常の負荷変動、全出力 100 % から 84 % の場合で、このときは原子炉系に不適当な擾乱を生ずることなく負の温度係数で処理される。この研究では温度係数としては実際の原子炉で期待される最小値の半分を用いたが、十分安定であることが示されている。

図 4.4 (b) はさらに大きい負荷変動、全出力 100 % から 25 % に階段状に変化した場合で、温度の上昇を制限するためには制御棒の動作が必要である。制御棒は 1~2 分でもとの位置に戻り、温度係数が原子炉を安定させている点注意しておく。PWR 発電所の全部の計測制御は明らかに膨大なものであるが、かなりの部分は二重に安全な運転のために、または単に情報を集める目的のために設けられている。

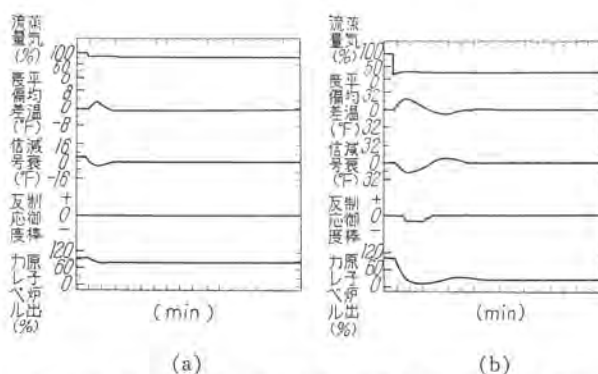


図 4.4 通常および異常に大きい負荷変動に対する原子炉温度状態のアナログ計算器による解析
(a) 通常の負荷変動（蒸気負荷 100 % → 84 %）
(b) 異常に大きい負荷変動（蒸気負荷 100 % → 25 %）

第 5 章 PWR 発電所の燃料取扱

第 1 節 燃料取扱装置

図 5.2 (a), (b) に示すように原子炉室の上部には燃料取扱用の水路が設けられている。この水路はいくつかに仕切られ、それぞれに注、排水しうようになっていて、燃料の貯蔵、炉心の分解、燃料交換用器具のサービスブロック、原子炉ピットなどの役割をするようになっている。

最初の炉心を装荷する時は別に放射能はないので原子炉ピットには注水していないが、再装荷時には運転員を放射能から防護する必要上取扱いはすべて水中で行われる。

最初の炉心は一体のユニットとして装荷されるが、再装荷時には压力容器の上ぶたを取りはずして炉心全体またはその一部を取替える方法と压力容器頂部にある燃料交換用ポートを介して燃料要素を取替える方法と二つの方法がある。

個々の燃料要素を取りはずす場合にはどの部分の燃料要素でも取りはずせるように操作のできる細長い把持装置を燃料ポートから挿入して行い、また炉心全体を取り扱う際には 100 トンクレーンと特殊な把持装置および治具を使用する。

第 2 節 最初の炉心装荷

最初の炉心は機械的な精度を確かめるため現地に送る前にベッティス (Bettis) で、シードの要素にカドミウムの中性子吸収棒（運転操作のための制御棒とは異なるもの）をつけて仮組し、冷却材および制御棒用の通路の寸法検査および制御棒の作動試験を行った。

炉心を装荷する際には事故を起さないよう十分な注意を払う必要があるが、核的な事故については実験によって次のような事実が確かめられた。炉心は乾燥していると、たとえ制御棒が引き抜かれても臨界にならない。水中では制御棒の挿入により全炉心を臨界以下に保ちうる。ブランケットがなくシード部分だけある時は水中で制御棒が引き抜かれた状態でも臨界にはならない。最初の炉心を装荷する時には制御棒またはカドミウム棒を所定の位置に取り付け、また炉心をつねに乾燥しているよう十分な注意を払うようにしてあるので、核的な事故は起らない。

SHIPPING ポートで炉心を再組立後、カドミウム棒を取りはずし、制御棒を所定の位置に挿入した。つぎに図 5.1 に示すような炉心つり上装置を取り付け、容器内につり下げた。この操

表 4.1 スクラムの条件

パラメータ	計測装置	計測範囲	スクラム	注 意
一次冷却材温度 (T _h)	抵抗温度計	475°F~575°F	T _h >555°F	
加圧器 (蒸気) の圧力	ブールドン管	0~3,000 psig	<1,600 psig	低温の状態から起動する場合 1,600 psig 以上になるまでは回路を開いておく。
原子炉容器圧力	ブールドン管	0~4,000 psig	<1,600 psig	上と同じ。ただし 1,800 psig 以上になると自動的に回路が閉じる。
120 V AC (原子炉安全系用)	SV 形リレー (半波)	電圧がなくなった場合 または降下した場合約 15 サイクル後に閉路	0.25 秒 (2 of 3)	リレーは電圧調整変圧器からブリッジ抵抗器により供給される。
120 V AC (核的計測用)	SG 形リレー (電圧降下)	電圧がなくなった後約 15 サイクルで閉路	0.25 秒 (2 of 3)	リレーは AC 電源からブリッジ抵抗器により核計測回路に供給される
中性子束 (出力領域)	補償形電離箱	定格全出力の 1~150 %	140 %	安全挿入およびスクラム条件は原子炉の出力対流量の比により決る。(3 つの電離箱の中二つが同時に信号を出す場合動作、いわゆる 2 of 3)
一次冷却ポンプの速度	速度選択スイッチに接続点	低速度で接続		ポンプが全速度でなくなる瞬間の決定に使用される。
一次冷却材流量 (ポンプ動力)	リット形リレーへの計 器用変圧器および変流 器	0~800 W、平衡三相 (120 V 計器用変圧器 および 5 A 変流器)	<50 % ポンプ動力	制御棒挿入およびスクラム条件は炉の出力と流量の比による。流量の喪失はポンプ動力のリレーが働いた後 (8 サイクルで) タイミング・リレーが閉じた時検出される。
一次冷却材流量 (主塞止弁)	弁塞の位置指示計	開いているときまたは 完全には開いてないとき	1/2" 閉じたとき	制御棒挿入およびスクラムの条件は炉の出力と流量の比により決まる。弁が 1/2" 以上閉じたときはその回路の流量がなくなったと同じ信号が出る。
手動スクラム	手動操作スイッチ		手 動	任意の時行うことができる。
シード燃料要素の温度	熱電対	500°F~1,500°F	~1,050°F	設定温度の正確な決定は未定。この系は T _h に代 ることができよう。

表 4.2 制御棒挿入の条件

パラメータ	計測装置	計測範囲	挿 入	注 意
中性子束 (出力領域)	補償形電離箱	定格全出力の 1~150 %	35 %, 70 %, 98 %, 120 %	設定値は炉出力と流量との比により決定 (2 of 3)
起動時の炉周期 (中性子源領域)	BF ₃ カウンタ	定格全出力の 5×10 ⁻¹⁰ % ~5×10 ⁻⁸ %	>1.74 d/min	2 of 3 または 1 つのチャンネル。
起動時の炉周期 (中性子中間領域)	補償形電離箱	定格全出力の 5×10 ⁻⁸ %~150 %	>1.74 d/min	上と同じ。ただしこの回路は 10 % 以上の出力で は手動で切離すことができる。
一次冷却ポンプ速度	速度選択スイッチに接続点	低速度で接続		ポンプが全速度でなくなる瞬間にもちいる。
一次冷却材流量 (ポンプ動力)	計器用変圧器および変 流器	0~800 W、平衡三相 (120 V 計器用変圧器 および 5 A 変流器)	<50 % ポンプ動力	制御棒挿入およびスクラム条件は炉の出力と流量 との比により決る。流量の喪失はポンプ動力のリ レーが働いた後 (8 サイクルで) タイミングリ レーが閉じたとき検出される。
一次冷却材流量 (主塞止弁)	弁塞位置指示計	開いているときまたは 完全には開いてないとき	1/2" 閉じたとき	制御棒挿入およびスクラムの条件は炉の出力と流 量の比により決まる。弁が 1/2" 以上閉じたとき はその回路の流量がなくなったと同じ信号が出る。
主発電機遮断器のトリ ップ	計器用変圧器および変 流器			種々の発電機、主変圧器および Np. 1. 所内用変 圧器事故の隠りリレーが働く。

作は一見容易に見えるが実際には炉心と熱遮蔽の間の間隙は 100分の6 インチしかなく、また直接肉眼では見えないのできわめてきわどい仕事である。そこでつかえたり、こすれたりするのを見るためクレーンには荷重のわかるスケールを取りつけた。またすべての手順をチェックし、とくにキーとキー溝の位置を確かめるため、模擬炉心を用いて炉心挿入の予行を行った。

第 3 節 燃料の再装荷

ブランケット部分の燃料をもっとも有効に利用するとすれば、その間に少なくとも 1 回シード部分の燃料を取り替える必要がある。したがって炉心部燃料の一部を取り出す方法を考える必要がある。また別の面からそれぞれの燃料要素を単独で取り出すことも必要である。すなわち燃料要素が破損した場合、その

程度が軽ければ燃料再装荷時まで続けて使用できるが、ひどい破損の場合には 1 本 1 本、交換する必要がある。

したがってすでに述べたように PWR では压力容器上ぶたに設けられた燃料取出口から燃料要素を 1 本ずつ取り出す方法と、上ぶたを取りはずして再装荷を行う方法と、二つの方法で使用済燃料を取り出しうようになっている。

3.1 燃料取出口からの再装荷

この場合燃料要素は図 5.3 に示すような燃料取扱装置を用いて取り替えられる。この装置はモータ駆動で制御盤についている運転員が操作するが、走行、横行、巻上、旋回、腕の屈伸の五つの動作を可変速で行い、しかも一時にこれらの動作を一つしかなないようにしている。

最初にはテレビカメラを水中に据え、スクリーンを運転員のそ

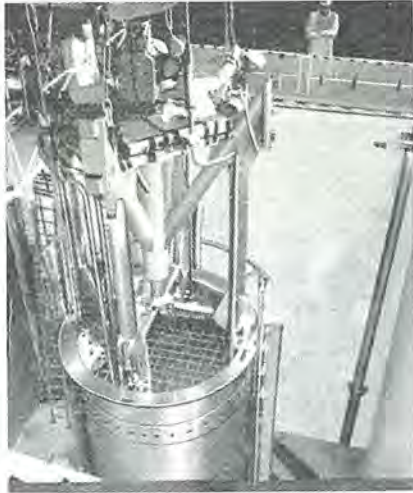


図 5.1 燃料取扱装置

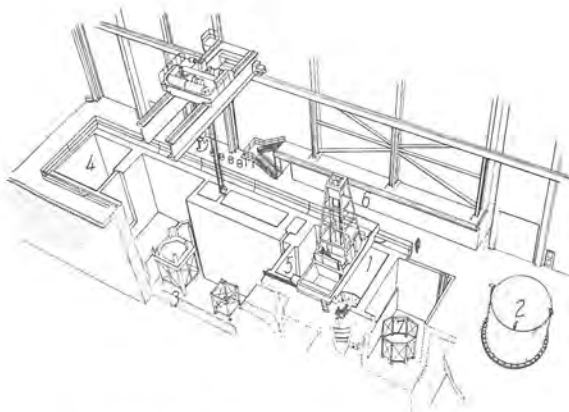


図 5.2 (a) 燃料取扱用水路ならびに装置

1. 原子炉ビット 2. 原子炉カバー 3. 炉心置場 4. 燃料貯蔵用ビット
5. 扉 6. 燃料取扱器具 7. 圧力容器上ぶた用ビット

ばに置いて、各燃料要素に対する腕の位置を定めて記録し、爾後の操作はカメラを用いずにこの記録だけで行いうるようになっている。

交換の操作はまず取出装置の心を合わせて燃料取出口から挿入し、十分挿入した位置でその頭部についている腕が開く。この位置で制御盤のランプがつく。つぎに目的の燃料要素の位置に指針を合わせる。この装置の頭部は燃料要素を炉心から取りはずせるよう設計されており、炉心とのロックがはずれると燃料要素はこの装置にロックされる。このロックの掛けはずしは頭部が燃料要素のグリッドにうまくはいつた場合にだけ行いうるようになっている。

取出装置の頭部に把持された燃料要素は炉心部を出るまで垂直に引き上げられ、ついで取出口に心を合わせて容器外に引き出される。

以上の操作中炉心部その他原子炉部分を損傷しないよう取扱装置の頭部にひずみ計をつけて異常な力が加わればただちに検出するようになっている。このひずみ計は燃料要素に働く水平力の不平衡も検知でき、その大きさと方向をオシロスコープに示すので、それによって装置の位置を是正する。

3.2 上ぶた部取りはずしによる再装荷

炉の上ぶたを取りはずせば燃料要素を単独でも、炉心全体で

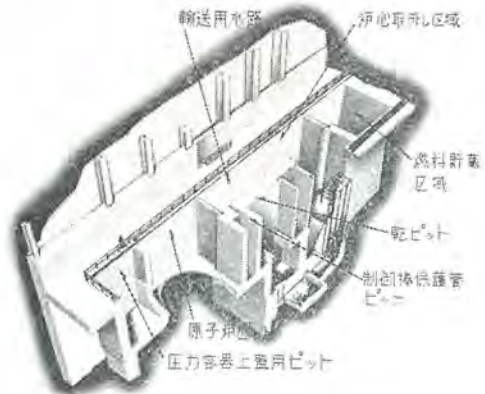


図 5.2 (b) 燃料取扱用水路

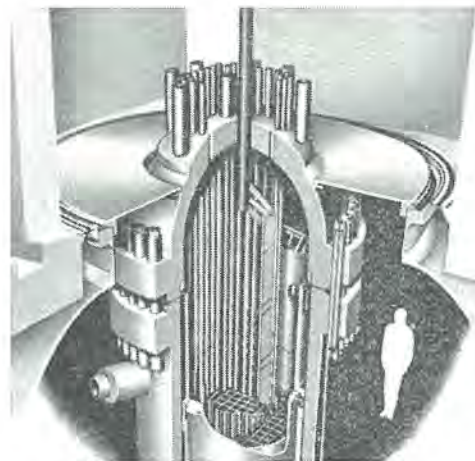


図 5.3 燃料取出口を通しての燃料交換
(原子炉容器ふたを除かないで行う)

も取り替えることができる。炉心の取出しは水路に水を張ることを除けば装荷の際と同様である。心出し用の治具を用いて把持装置をセットし、また引き出す際の案内も兼ねる。図 5.1 に示すようにこの治具の片側はあいていて、炉心を横に動かして貯蔵用ビットに入れうるようになっている。

3.3 特殊燃料取扱装置

上記以外に使用済燃料の輸送に用いる遮蔽付格納容器、遮蔽および冷却装置付の運搬車、破損した燃料要素を格納する板金製の密封容器などがある。

またブランケット燃料要素を分解し、燃料棒の検査あるいは交換を行えるようにした設備も準備する必要がある。再装荷時にも水中テレビジョンを使用し、炉内または炉外の水中の諸操作を観測することもあり、また同じ目的でペリスコープを用いる場合もある。このペリスコープには必要に応じカメラを装着することもできる。

再装荷の際その操作に重大な誤りを犯さないかぎり災害は起らない。カドミウム棒または制御棒のいずれかが炉心に挿入されていれば核的事故は起らない。また燃料要素、炉心は原子炉ビットの水中から引き出せないようになっているので、放射線による危険もない。

第 6 章 放射性廃棄物処理

第 1 節 ま え が き

PWR 原子力発電所の放射性廃棄物源のおもなものは一次冷却系である。放射性廃棄物の生ずる原因としては二つ考えられる。その一つは腐食生成物および冷却水中の微量成分が放射性になることであり、もう一つの原因は破損した燃料要素から出る分裂生成物が放射性であることである。このような放射性の液体またはガスは主冷却系の各所で冷却材排出系に集められ、廃棄物処理系に送られる。

この系を計画するに当っては、おもな放射能源が破損した燃料要素であることから、考える最悪の場合として、炉心内に破損した燃料要素が 1,000 本ある場合を仮定した。もちろん系統には破損した燃料要素を検出し、取り出す方法を講じてあるので、一時にこのように多数の破損燃料要素が存在することはまずないといつてよい。

PWR で生じた廃棄物は自然崩壊を待つか、希釈するか、濃縮して貯蔵するか、あるいはこれらを適当に組み合わせた方法で処理される。放射性を帯びた液体、ガスまたは固体は発電所内はもちろんその周辺にも災害を及ぼさないよう廃棄物処理系で処理される。

第 2 節 液状およびガス状廃棄物

液状およびガス状の廃棄物の取扱いはその放射能の程度により変わってくる。液状の放出物はすべて地下にあるコンクリートで囲った不銹鋼製のサージタンクに流入し、ここで放射能を測定する。この放射能が比較的半減期の短いものであれば、そのままタンク内に貯えて減衰を待ち、そうでないものは純水装置およびガス抜きを通す。許容限度以下に減衰した液体は復水器冷却水に混ぜオハイオ (Ohio) 河に放流する。

混床式純水装置において可溶性の放射性不純物および粒子が除去される。また溶解した分裂生成物ガスは蒸気ガス抜で除去され、鋼製タンクに貯え、安全な程度に減衰すれば大気中に棄てられる。このようにして処理された液体は試験タンクに送り、試料検査を行って、水と混合して放出してよいかどうか検査する。

液体およびガスともに放出の前後、発電所外の各所に設けた試験場で監視し安全性を確かめている。

各種の器具類の除染に用いた液体のように固形分の含有量の多い液状廃棄物は蒸気圧縮蒸化器で処理し、蒸化器を出た蒸溜水は液体サージタンクに送られ、また濃縮された固形分はセメントに混ぜ、缶につめて海中に棄てられる。

第 3 節 固 形 廃 棄 物

固形廃棄物はその性質により、焼くか、所内の地下にたくわえるか、または海洋中に棄てるかいずれかの方法で処理される。

可燃性の汚染廃棄物、たとえば紙、ぼろ、衣類などは焼却炉で焼く。この時に出るガスは洗浄し、フィルタを通して固形物を取り除く。これらの固形物および廃棄水は樹脂貯蔵タンクに送られる。

純水装置の樹脂は使用後耐水性コンクリートで囲んだ不銹鋼製の地下貯蔵タンクに送られ、ここで固形分は沈澱し、液体は取り出して必要に応じてさらに処理した後排出される。このタ

ンクには最大消費率で 5 年間に蓄積すると思われる使用済樹脂を貯蔵できる。

タンク内の樹脂は試料を採取して監視し、樹脂に含まれた分裂生成物が十分に減衰して安全に取り扱いうるようになればタンクから取り出し、不燃性廃棄物として取り扱われる。

不燃性の固形廃棄物、たとえば工具類とか小さい部品などは金属性の缶に密封し、さらにこれらの缶は集めて大きいドラム缶に詰め、間隙にはコンクリートを詰めて遮蔽し、海洋に廃棄する。

第 4 節 廃棄物処理操作の管理

4.1 管 理 系

流動性の廃棄物は廃棄物処理系に流入する前、系内の各処理操作の前後および発電所から排出する前に試料採取を行うようになっており、またガス状ならびに液状の希釈された流動性廃棄物は希釈後の状況を監視しうよう試料採取装置が設けられている。この系は必要に応じて再希釈を行い放射線量を許容レベル以下に落すための再処理もできるようになっている。

多数の試料採取装置に加えて、主液体流出系のヘッダおよびえんとつに排出物の放射線量を監視する装置も設けられ、許容限をこえた放射性廃棄物が所外に排出されないよう万全の対策を講じてある。

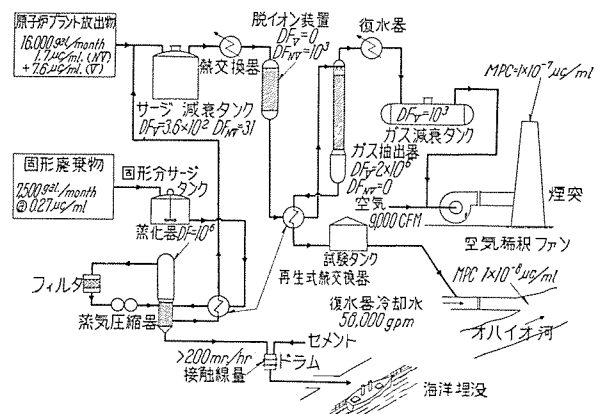


図 6.1 放射性廃棄物処理系フローシート No. 1
記号説明 NV 不揮発性 V 揮発性 DF 除染係数
MPC 最大許容濃度 CFM 立方呎/分

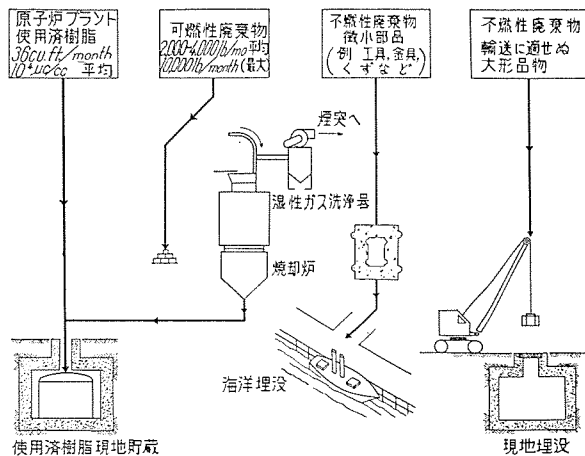


図 6.2 シッピングポート原子力発電所廃棄物処理系フローシート No. 2

4.2 周辺地区の管理

PWR 発電所周辺地区に自然に存在する放射性物質の形および量と発電所の運転開始前約1年半の期間におけるこれらの物質の量の変動を調べるため、1956年の初頭から周辺地区の監視が開始された。この調査は運転開始後行われる結果と比較して原子力発電所の運転による放射能が許容範囲に収まっていることを確かめるために行われたもので測定の対象としては

- (1) 発電所周辺地区の土壌
- (2) 発電所の上流点および下流点におけるオハイオ河の水
- (3) 発電所より半径1マイルの範囲内にある井戸水
- (4) 周辺地区の植物
- (5) 周辺の空気

が選ばれた。

河水の分析地点としては上記発電所の上流点および下流点のほかに、下流域でオハイオ河の水を最初に利用する場所であるミッドランド (Midland) の水道水取入口が追加された。

空気中の放射性塵およびガスの存在を検知し、周辺における放射線の自然量を測定するため移動式監視所が5台運転され、うち4台は定点での監視を行い、残りの1台が移動監視を行っている。

定点の位置は風向および風速をもとにして米国気象庁が決定したが、発電所の風上ならびに風下地区における放射線濃度をできるだけ正確に指示するような位置が選ばれている。

現在発電所付近の河底などの泥および藻類についても調査が行われているが、放射性廃棄物排出後同様な調査を行えば廃棄物の河中での分布がわかるものと思われる。

第7章 PWR 発電所の安全防護

第1節 ま え が き

歴史的に見てPWR 発電所ほど安全に関して厳格に、労力をかけて設計され、建設されたものはないであろう。実際通常の安全規準から見ればこれは明らかに大事をとり過ぎている。安全に関してまず第一に考慮を払われたのは発電所用地外の放射線による災害の問題である。発電所における訓練、運転、試験に際してこれはまず第一に要求されることである。

この章で述べる安全防護はすべて従業員および機器を防護するためにとられる通常の配慮の程度をはるかにこえたものである。このように広範にかつ徹底的に安全防護を考慮した第二の理由は将来の発電所に必要な防護を評価するために必要な情報をうるためである。

総体的にいて原子力を熱源に使用することは必然的に通常の火力発電所にはなかった潜在的な危険性を持っている。すなわち放射性の粒子または分裂生成物が事故のため放出されて、発電所用地外の住民に生物学的な災害を与える可能性がある。しかし分裂生成物の放出は発電所の適当な設計と建設により防止することができる。

PWR 発電所は物理的、化学的あるいは核的な爆発の結果発電所用地外に災害を及ぼすようなことは決してない。さらにPWR 発電所では起りうる一連の事故により危険な量の分裂生成物を用地外に放出するようなことはないよう設計されている。

上に述べたことは運転員の誤操作または機械的な故障による事故の可能性はないと仮定しているのではない。実際上の結論は起りうると思われる最悪の可能な一連の事故を考慮に入れて出されたものである。

第2節 運転に関する安全性

PWR 発電所に使用された機器および系統の設計、製作、据付に際しては極端に注意が払われたけれども、以下の考察においては運転の誤操作はないとは仮定しない。念入りの計測および制御によりもし万一事故が起った場合にも十分な警告を与えることができる。

分裂生成物が外部に放散されるためには、それは三つの障壁を通過しなければならない。燃料の被覆がその第一の障壁である。分裂生成物がこの第一の障壁を突破してもそれらは一次冷却系内を循環するに過ぎない。この一次系は全溶接で漏洩がまったくないよう設計されている。これが第二の障壁を形成する。第三の障壁は発電所コンテナ (蒸気コンテナともいう) でこれは相互に連続された四つの気密な鋼製圧力容器である。

(図 7.1, 7.2 参照)

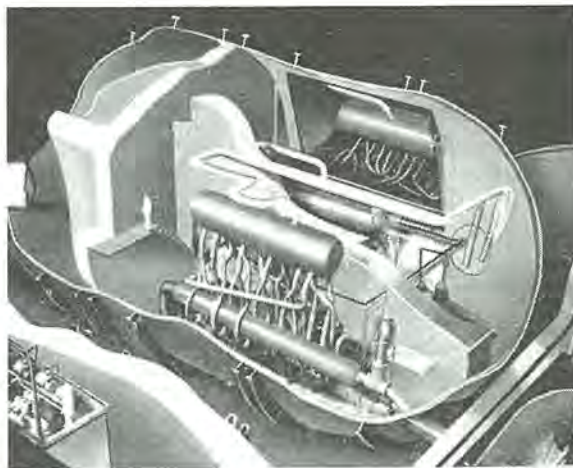


図 7.1 ボイラ室

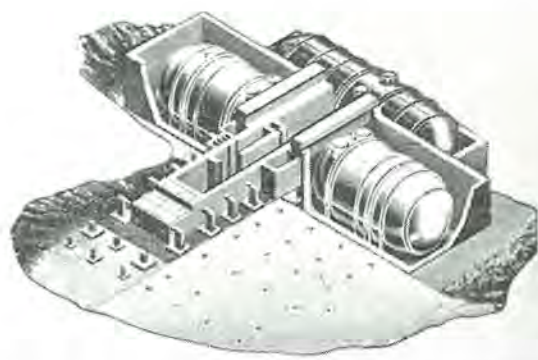


図 7.2 中央が燃料取扱いの水路、二つ相對しているのがボイラ室 (蒸気発生器を各2基ずつ入れている)
右上が補機室 (加圧器その他の補機を入れている)

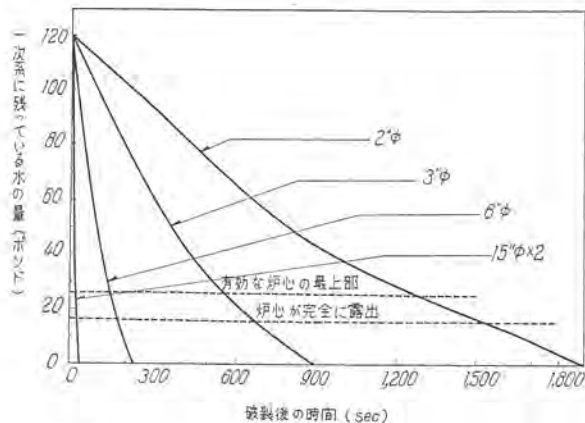


図 7.3 種々の大きさの配管の被裂に対して炉心が露出する最少の時間

これら三つの障壁により本質的に安全であるにもかかわらずすべての起りうる事故に対して洩れなく検討が行われた。ここですべての事故の可能性を考察することはできないから、原子力発電所の開発に必要な計画の性質を示すため 2, 3 の例をあげて説明する。起りうると思われる事故の中でもっとも重大な二つは一次冷却水喪失事故と反応度事故とである。そこでこれらの可能性を簡単に考察することにする。

第 3 節 冷却材喪失

PWR よりもさらに高温高压のものを含めて多くの高压系の経験によって、また機器の製造に際して払われた周到な注意のため配管あるいは容器の重大な破裂はきわめて起りそうにもない。しかし重大な破裂の周囲の地域に及ぼす災害の可能性を考慮してこの事故は非常に詳細に研究された。

この事故の程度は破裂箇所的位置と大きさにより決まる。十分大きな破裂の場合には加圧器および原子炉容器中の水位は低下しはじめる。加圧器内の水位が低水位警報の高さに達するとか、または圧力が 1,850 psia に下がるとかそのいずれが先に実現しても警報が鳴る。そのときは運転員は緊急時の操作を開始する。圧力が 500 psia に達すると安全注入系が起動される。もしも破裂箇所が炉心の高さより上の場合には、安全注入系により炉心は短時間で水中に没し、炉心の溶融、分裂生成物の放出は起らない。しかし重大な破裂が炉心より低い場所で起ると、安全注入系が炉心を再び水中に没するためにはしばらく時間がかかり、その結果若干の炉心の溶融、分裂生成物のコンテナ内への放出が起る。いずれの場合にも水が炉心の最上部に達した後は、漏洩箇所が隔離されるかあるいは崩壊熱が十分減少して燃料の溶融が起らないようになるまでは水は連続的に供給される。(図 7.3 参照)

この冷却材喪失事故を完全に解析する前にいくつかの結論が引用されなければならない。これらのうち PWR にとってもっとも重要なものを以下に述べることにする。

3.1 一次系のいづこかに脆性破壊が起りうるか

高温の一次冷却水を入れている容器あるいは配管の脆性破壊は起りうる事故とは考えられない。一次系の配管および大部分の機器はオーステナイト系の鋼で、これは通常の発電所の周囲

の温度またはそれ以上の温度では脆性破壊を起さない。原子炉容器、加圧器および四つの蒸気発生器のうちの二つはフェライト鋼であるが、その延展性が脆性の範囲にはいるような低温で加圧しないよう運転規準をつくってある。

3.2 重大な脆性を示すほど機器に放射線損傷が生ずるか

一次系冷却水を入れる PWR 容器のどの部分も認めうる程度の延展性の減少をきたすほど放射線を受けない。原子炉容器自身が高い中性子束を受ける唯一の機器であるが、運転温度が比較的高いため常時鈍化が行われ、そのため放射線損傷の影響は最小限に止められる。

3.3 どの程度の破裂が実際に起りうるか

設計、加工に際して払われたたみならぬ注意により、原子炉容器の重大な破裂は起りそうもないと考えられる。蒸気配管に関する従来の経験によれば重大な破裂はその確率がきわめて小さく、恐らく起りえないと考えられる。経験によれば PWR 発電所に使用されているような不銹鋼配管で割れ目が生ずることが時にあるけれども、このような事故は PWR の場合よりもさらに高温できびしい条件のもとで起っている。このような割れ目から重大な破裂が生じた記録は見あたらない。従来の工業上の経験によれば小さい配管がもっとも破裂しやすい。

しかし安全側に設計をするため、配管の断面積の 2 倍に相当する面積の軸方向の割れ目が一次冷却系の主配管 (18" OD, 15" ID) に起りうると仮定し、これを起りうる最悪の破裂と考えた。

3.4 配管はどのように破れるか

工業用配管破裂の研究によれば主配管の突然の円周方向のせん断は起りうる事故ではない。このことおよびその他の理由によって縦方向の割れ目が配管破裂の可能な形と考えられた。

3.5 冷却材喪失事故をひき起すような原子炉系の容器、配管の圧力の異常な上昇が何か他の事故で起りうるか

起りうる事故により設計の限界をこすような圧力を生ずることはあり得ない。発電所が 100 MW の電気出力を出しているときタービンのスロットルがトリップし、原子炉がスクラムしない場合でも、原子炉系の圧力リリーフ弁により原子炉系の圧力が設計圧力 2,500 psi をこすことはない。

3.6 事故の起った際電源は確保されるか？ 安全注入系は確実に働くであろうか

研究の結果によれば冷却材喪失事故が発電所内の動力の完全な喪失をきたすことはなく、また所内電源喪失事故が冷却材喪失事故の原因にはならない。互に関連のない原因により冷却材喪失と所内電源の喪失とが同時に起るといふ事象は起りうる事故とは考えられない。デューケン電力会社の記録によれば、発電所内の動力の完全な喪失は 25 年に 1 回の割合でしか起らない。これやその他の理由により安全注入系ポンプを運転するには電力が用いられ、この系がありそうもない冷却材喪失事故中使用される。

3.7 原子炉コンテナは必要か？ 換言すれば冷却材喪失事故は炉心の溶融、かなりな量の分裂生成物の放出を伴うか

コンテナの建設費がかなりな額になることを考えるとき、この問題は安全の点からだけでなく費用の点からも重要である。コンテナをつけるという決定は、PWR の詳細な設計が

始まる前に実際上行われた。以後の研究によれば安全性の観点からのコンテナの必要性に関して重大な疑問が生じた。コンテナは冷却材喪失事故に対してだけすなわち最悪の事故にたいしてだけ安全の機能を果たすに過ぎない。しかしこの最初の原子力発電所においては極端に設計は安全側に行われ、コンテナもつけられることになった。

このようにして想定しうる冷却材喪失事故は完全に探究され、相次いで事故の起る場合、発電所内の相互作用、その他すべての事象が詳細に、かつ注意深く研究された。

3.8 む す び

研究の結果つぎのような結論が引出される。冷却材喪失事故の場合、炉心が溶融しないならば原子炉冷却材が全部直接周囲に放出されても、発電所用地外に生物学的災害を生じない。(もちろんコンテナはないと仮定したときである) この結論は炉心が 270 MW で 3,000 時間運転し、一次冷却材中には 1,000 本の破損燃料要素のため運転中考えうる最大の放射能が含まれているとした場合でもなりたつ。破損燃料のこの数は炉心寿命中破損すると考えられるブランケット燃料棒の最大の数である。炉心の一部が溶融し、分裂生成物が放出される最悪の事故の場合にも、コンテナは分裂生成物の放散を完全に防ぎ、発電所用地の境界でも災害は生じない。

第 4 節 反 応 度 事 故

反応度事故は通常の出力上昇に必要とされる以上の反応度挿入事故である。このときには原子炉の出力レベルは必要以上に急速に増加し、もしそれが押えられないときは燃料要素の局部的な過熱が起り、その結果燃料要素被覆の溶融、分裂生成物の冷却材中への放出が生ずる。種々の形の反応度事故を考察する前に次の一つの事実を明らかにしておかなければならない。たとえすべての安全系の回路が故障しても、どのような反応度事故に対しても原子炉は自己制御性により停止する。原子炉の冷却流路に蒸気が発生し、その結果減速能力が減少し出力が減る。蒸気の発生は局部加熱をきたし恐らく炉心に損傷を与えるであろう。しかし放射性生成物は一次系から外に出ることはない。以下に三つの反応度事故を考えて見よう。

4.1 制御棒引抜き事故

この事故は制御棒が必要以上に引き抜かれる場合である。この種の事故は起動時にもっとも起りやすい。この事故を防ぐために何段もの安全系がある。その中の一つの自動安全装置は起動率制限であって、これはすべての制御棒引抜き信号より強いものである。中性子束変化率が設定値をこす場合にはこの制御機構が働いて制御棒を挿入する。

この制御系の後備保護はスクラム制御であって、これは出力が通常運転レベルをこえる場合自動的に制御棒を挿入する。起動時はポンプは通常半速で運転されるからスクラム動作の設定点は定格出力の 70 % である。他のスクラム装置は 140 % に設定されており、ポンプの台数および速度に無関係に働く。(表 7.1 参照)

制御棒引抜きの最大速度を押えることはまた制御棒引抜き事故を制限する。この制限を適当につけることにより、炉心に損傷を与えるだけ十分の反応度を挿入するには比較的長い時間を

表 7.1 出力対流量比によるスクラムおよび制御棒挿入の設定

流 量	挿入を開始すべき出力	スクラムを開始すべき出力
ポンプ 4 台, 全速	120 %	140 %*
ポンプ 3 台, 全速	98 %	120 %
ポンプ 2 台, 全速	70 %	98 %
ポンプ 2, 3 または 4 台のとき, 半速	35 %	70 %

* この設定値は流量すなわちポンプの台数および速度には無関係でつねに有効である。

要することになり、したがってこの事故が運転員に気づかれないうまに進行していく可能性は少ない。起動時を除いては運転員が制御棒を調節する必要はそんなにない。通常の負荷変動は反応度の負の温度係数により調節される。また温度 1°F の調節に要する制御棒の動作時間は約 2 秒であり、運転員が調節すべき温度はせいぜい 2~3°F に過ぎない。このようにして制御棒引抜き事故は通常より長い時間にわたっての制御棒の動作を必要とし、したがってこのような事態が運転員の操作により起る可能性は少ない。

4.2 蒸気系の弁による過度の熱除去

蒸気系の弁が突然開いて過剰の蒸気をにがす場合一次系の温度降下により起る災害に対しても多くの安全系が準備されている。たとえば発電所が通常運転しているとき蒸気リリーフ弁が一つ開いたとすると、出力と流量との比を監視する自動装置は原子炉出力を抑制する。この後備保護として異なる出力レベルで動作するよう設定された二つのスクラム信号が炉を停止し、炉心の損傷を保護する。しかし一般的にいて原子炉を出力運転(定格出力の 1 % 以上)している場合の蒸気弁の誤動作は大した影響を及ぼさない。これは蒸気発生器(ボイラ)の熱伝達能力により過剰出力が妨げられるからである。

起動時、負の温度係数で制御できるだけの出力レベルに達していないときには四つの異なる制御系が原子炉を保護する。まず第一に中性子束の増加が設定値をこえた場合通常で速度で制御棒を挿入する。この制御はもちろん運転員による制御棒引抜き動作より強いものである。この安全系の後備保護として上に述べたのと同じ出力対流量の比の制御が原子炉出力を抑止する。もし出力と流量の比が適当な値からはなはだしくはずれた場合には他の制御系が原子炉をスクラムする。最後の、そして第四番目の制御系は炉の出力レベルが設定値(定格出力の 140 %)に達すると原子炉をスクラムする。以上四つあげた制御のうち二つは通常の制御棒挿入速度で出力を抑え、他の二つは制御棒を落下させて急速に炉を停止する。

4.3 冷 水 事 故

もしもかなりの量の冷水が突然原子炉に挿入されると、負の温度係数により原子炉出力は急激に増加する。十分な量の冷水導入源として考えられる唯一のものは休止している一次冷却回路である。そのような事故は二つの独立な安全系により防止される。その一つはいわゆる温度鎖錠で、これは休止している回路の温度と運転中の回路の水温とを比較する。もし温度差が設

定値 20°F より大きいときにはポンプは起動できない。第二の系は弁の鎖錠で、これは原子炉がスクラムしていないときに休止している冷却回路の主塞止弁を開くことができないように制御棒の制御系の遮断器についている鎖錠である。このようにしてどれかの冷却回路の主塞止弁がいったん閉じられると、その回路は原子炉が臨界中は再び運転状態にはいることはできない。

第 5 節 廃棄物処理系による災害の可能性

一次系において行われたと同じ最悪の場合の災害の研究が廃棄物処理系についても行われた。二つの極端な場合、すなわち気体廃棄物の放出と液体廃棄物の放出とを考える。

たとえば一つのガス貯槽が突然破裂してその中のガスを全部一度に吹き出した場合を考えよう。このタンクは最大の期待値の放射能を含んでいたとする。すなわち 1,000 本の破損燃料をもつ炉心で 3,000 時間全出力で運転した後の一次冷却材中の放射性ガス全部をタンクが入れていたと仮定する。これはもちろんきわめて極端な仮定である。

上に述べた条件の下で、平均の気象条件を仮定するとこの放射性ガスの雲により人が受ける線量はきわめて小さく、この廃棄物系ガス貯槽から 100 m (約325 フィート) のところで 7×10^{-2} レントゲンで、さらに距離が増すにつれて急速に減少する。悪い気象条件すなわち大きな温度逆転のもとでも 100 m のところで3 レントゲンで、距離が増すにつれてやはり急速に減少する。これらの条件は非常に極端に悪いものをとっており、その場合でもこのように線量が小さいことを考えると、結局ガス貯槽の破裂による放射能の災害は存在しない。

液体廃棄物の場合、運転員が決まった運転手順に従わないで一つのサージ・減衰貯槽の中の全液体を直接川に放出するとどうなるであろうか？さらに悪い条件として液体の量は原子炉一次系中に含まれている全量に等しく、その放射能は期待しうる最大値で、かつ液体は他の廃棄物処理装置による処理はまったく行われていず、減衰期間は通常 45 日であるのに対しこの場合1 日しかたっていないと仮定する。このような最悪の、しかも起りそうもない条件の下でも川への放出点における液体の放射能は最大許容濃度の 1.8 倍にすぎない。しかも川に出ればこれはさらに希釈され、約半マイル川下の最初の使用地点では十分許容量以下になる。

これらの状況は、多くの運転上の過失および条件が誇張されているだけでなく、廃棄物処理系で使用されている安全装置および監視装置があることも考慮するとききわめて起りそうもない。かくして放射性廃棄物処理系は周囲の公衆に災害を及ぼさない。

運転に関する保護系に加えて安全性が設計、製造のすべての段階で取り入れられている。各部品、また各部品の組合わせに対しては徹底的に試験が行われている。このゆえに PWR 発電所はこの種の原子力発電所の最初のものであるけれども、安全性という点は発電所のすべての装置に関して第一に考えられており、起りうる事故により発電所用地外の公衆に対して生物学的災害を与えることはありえない。

第 8 章 発電所職員とその訓練

第 1 節 ま え が き

原子力発電所の運転は普通の発電所と比べて別にむずかしい点はないが、もっとも熟練した運転員でも通常の発電所では経験したことのない問題に当面しなければならないことと、この発電所が実験用を兼ねているため電力を発生すると同時に種々のデータを集める必要上多数の運転員を要することがいちじるしい特長である。

第 2 節 職 制

SHIPPINGPORT 発電所の運転ならびに保守のための職員の人選および訓練は1954年に開始された。この職員の仕事は発電所の原子炉関係部分を含めたすべての機器の運転および保守、発電所施設の維持、工業衛生上の諸サービス、発電所の保守、およびその他の事務といった多岐の方面にわたっている。

職制は表 8.1 に示すとおりで所長が最高の責任者で、不在の際は主任技師がその職務を代行する。

前述のようにこの発電所は通常の運転、保守に加えて、試験ならびにデータの収集という二重の目的を持っているので職員数は約 135 名となっている。このうち26名は試験関係専任である。残余の職員は主として運転、保守に従事するが、一部は必要に応じ試験にも関係する。

運転経験を積みめば職員は約 81 名に減員される予定である。それでも普通の石炭焚発電所の人員 66 名と比べるとやや多くなっているがこれは人員に余裕を持たせてあるためである。

第 3 節 職 員 の 訓 練

SHIPPINGPORT 発電所の運転および保守のためには発電所と原子力系統と両者の運転に熟練した人員が必要であるが、こういった人員は簡単には集めることができないので、発電所の経験者の中から人選し、原子力関係の訓練を行うという一般方針の下に周到な計画がたてられた。

訓練の方法としては各地の AEC 施設および現地における実習、発電所運転についての講義、機器類の試験または組立工場への見学旅行などがあげられる。

実習はアイダホ (Idaho) 州アーコ (Arco) にある海軍原子炉施設 (NRF) および材料試験炉 (MTR)、サバナリバー (Savannah River) 工場ならびにベティス工場で行われた。

NRF では 48 名の従業員が延べ 171 カ月 (1 人平均 3.6 月) にわたり原子炉施設の化学、保健物理、保守、運転、計装および制御、試験などについて実習を受け、場合によっては NRF の運転員と一体になって仕事をしたこともある。

MTR では数名の従業員に原子炉運転に必要な保健物理および化学の訓練を行い、また原子炉計装ならびに制御技術者はサバナリバーで約 6 カ月の実習を受けた。

ベティス工場では講義と実習の両方が行われた。運転員中幹部職員 7 名は 1 年間ベティス工場に勤務し、原子炉、遮蔽ならびに冷却系統の設計、発電所の解析、ベティスにある試験設備および PWR の臨界試験設備の運転に従事した。化学者、保健物

理学者および原子炉技術者もベテニスで訓練を受けた。

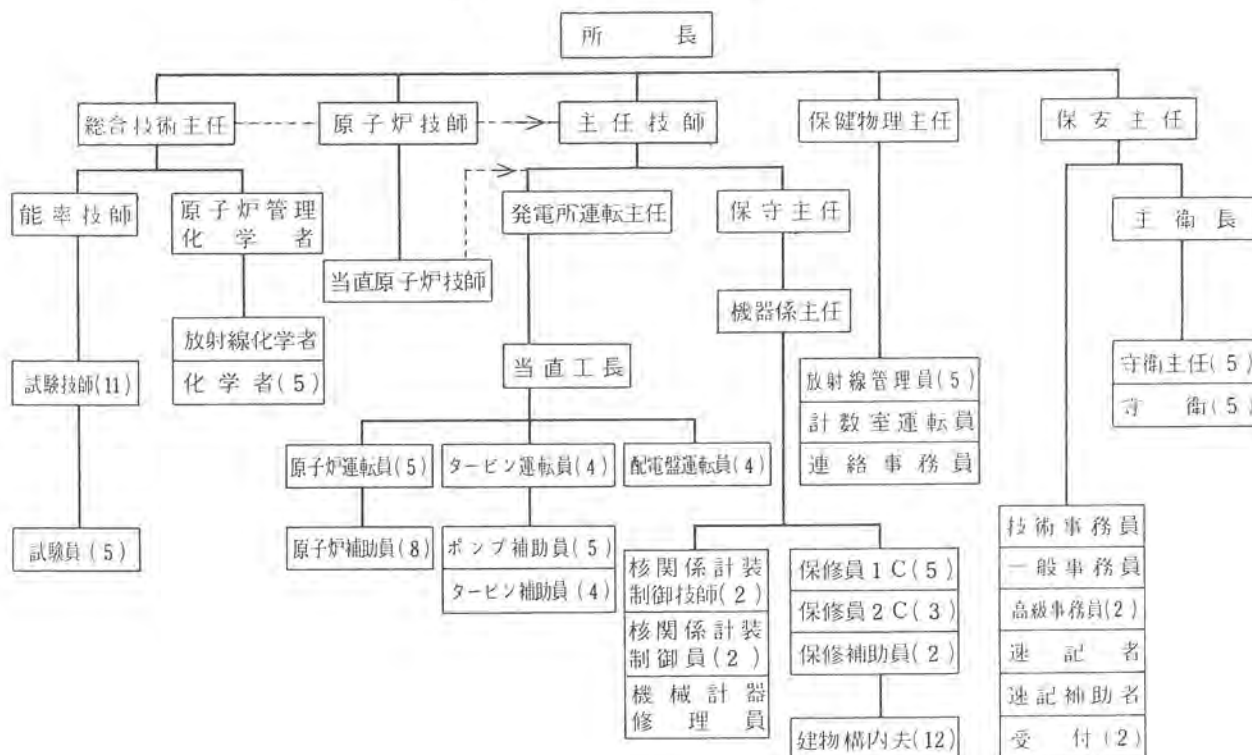
Shippingボート発電所でも実地訓練が行われた。指導計画、講義、準備運転中の各種機器の運転実習がおもな内容である。

シミュレータによる実際の原子炉およびタービンの運転に即した実習も行われた。

講義は核物理、応用電子工学、原子炉工学など仕事に必要な基礎知識を与える目的で大学教授を招聘して行われた。

以上のほか一部の職員は計装、制御、燃料要素、制御棒駆動機構、炉心取扱装置などの製作および試験を見学するためそれぞれの製作工場に見学旅行を行った。

表 8.1 Shippingボート発電所組織



次号予定

三菱電機 Vol. 32 No. 9

照明特集

- 照明10年の歩み
- アメリカにおける照明の現況雑感
- 照明普及運動の動勢
- 蛍光灯における電極加熱が発光効率に及ぼす影響
- 新しい形の蛍光水銀灯
- カラー蛍光ランプ
- 光り天井照明
- 高出力ラビッドスタート蛍光灯の経済問題
- 工場照明の経済的計画の一方法
- 電源電圧変動に対応する蛍光灯と白熱球の光束変動の比較

- 防爆形蛍光ランプおよび照明器具
- 蛍光灯の高周波振動
- 蛍光水銀灯によるテニスコートの照明
- 蛍光健康灯による佝僂病予防の至適照射値および全実験動物の病理解剖学的所見およびその眼に対する影響に関する実験的研究
- 家庭用蛍光灯器具とインダストリアルデザイン
- 織物検査用光源と蛍光ランプ(2)
- 照明意匠
- 技術解説：最近の米国照明施設の展望(その2) 火力発電シリーズ

原子力発電所の機器

(Westinghouse Engineer, Vol. 18, No. 1, Jan. 1958, p. 5)

キャンドモータポンプ

液体金属の中でナトリウムナトリウムカリウムの合金は沸点が高く、高温でも安定であり、熱伝達特性も良い。また水に比べて比重もわずかに小さく、粘性もほぼ等しいので循環ポンプは水ポンプと同じ出力で循環させることができる。これら液体金属を原子炉の冷却材として用いる場合のために無漏洩のキャンドモータポンプが開発された。まず15馬力のキャンドモータポンプが試作された。これを 1265°F で試験を行いさらに長期運転が 1,000°F で 3,000 時間行われた。この結果ポンプの設計は十分であり液体による電動機の温度上昇も十分防ぐことができることをたしかめられた。ポンプ部分の流体温度はボリュートの材質が許せば 1,600°F まで上げて電動機の側は十分な熱絶縁が行われる。W 社は現在液体金属用のキャンドモータポンプとして 170 馬力と 700 馬力のもの各 2 台を製作中である。

制御棒の駆動装置

原子炉の制御棒駆動機構はいろいろな方式が考えられているが安全と確実な操作を行うにはかなり複雑な機構になってくる。この制御機構の研究のために今までに多くの時間がついやされた。潜水艦用原子炉の制御棒駆動装置はねじ送り式で制御棒を上下させる方式のものである。送りねじの先端に制御棒が取り付けられ送りねじはリアクタンスモータのロータから突出している二つの割ナットではさまれて結合している。割ナットは緊急時に電流を断てば二つに開いて送りねじとの結合が解ける。常時運転の際はナットと送りねじの結合は爆雷の衝撃にも耐えるように確実なものである。衝撃のない陸上の原子炉ではジャックタイプの制御棒駆動機構が開発された。この方式はねじ送り式の代りに 1/2 インチの不銹鋼の棒の束を用いている。上述の棒の束を二つに割れたリングが外部から加えられる磁気コイルの作用で締めつけている。このリングの開閉は磁気コイルで制御されており下部のリングが閉じて棒をつかみ引き上げて一定の距離を移動すると上のコイルが閉じて棒をつかみ先のリングは開いてまた元の位置にもどる。このようなしゃくとり虫の操作をくりかえして棒を引き上げる。緊急時に棒を落下させるには両方のリングを開方し自重で落下させればよい。

この新しいジャック機構は非常に正確に送り速度をかえることができる。送り速度は零から毎分 8 フィートまで変化でき、落下の加速度も約 1g でラッチ機構がないため送り棒とつかみの間隙も最も小さく設計してよい。この方式はベルギー 向の BR-3 に用いられた。

蒸気発生器

ヤンキ発電炉の建設について 4 個の大形蒸気発生器が製作された。この発電炉は四つの冷却系統をもっておりおのおのにキャンドモータポンプと蒸気発生器がついている。蒸気発生器は従来の横形と違って縦形で 7 フィート直径、高さ 38 フィートの巨大なものであり、空重量 83 ton 満水で 114 ton のものである。冷却材は下部に 2,000 psi 530°F の温度で流入し 3/4 インチ径の 1,620 本の U 字形管を流れる。管のさきえ板の

厚さは 13 インチ直径 7 フィートの大きさに冷却材の側は 1/2 インチのステンレス鋼板でクラッドされている。管の束は蒸気発生器内で薄い板の筒で包まれており給水は発生器の上部から入り銅板と包板との間を降下し下方から管束の間を抜けて上昇する。この間に加熱され蒸発する。沸騰水と冷い給水の密度の差によって管束の間では自然対流が行われている。包み板の上部はしばられて出口はせばめられておりその途中に遠心力による気水分離器が装置されている。さらにその上部は蒸気ドラムの役目をなしその中に二段の気水分離器を内蔵している。1 段はチェブロンタイプのもので 2 段はセントリフィックタイプである。そして最終段でターゼン側へ送り出す蒸気の湿分は 1/4% 以下になっている。(研究所 藤原 智訳)

46 kV リクローザ

(Westinghouse Engineer, Vol. 18, No. 1, Jan. 1958, p. 9~10)

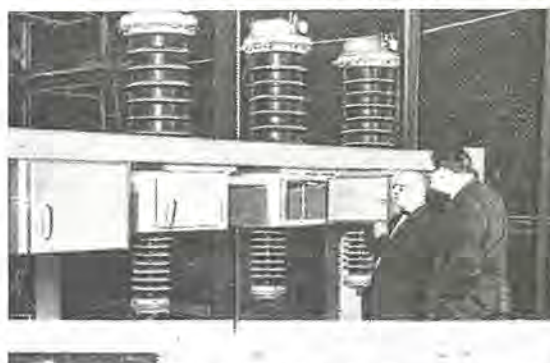
W 社では新しく 460SF250 形のリクローザを開発した。すなわち 46 kV 回路用の、六弗化硫黄ガス入りの遮断容量 250 MVA を有するリクローザである。

この新遮断器は Consumers Power 会社用に開発されたもので、特性は低圧のリクローザと同じく 3 回の再閉路を行い 4 回目の遮断でロックされる。リクローザのトリップは 150 A から 400 A まで調整できる。遮断部分は昨年発表された 115 kV 1,000 MVA の六弗化硫黄ガス遮断器をもとにして作られた。

機構的にこれは閉路状態でスプリングを引っぱってラッチをかけ、このラッチをはずして回路を開く方式の遮断器と似ている。このことは常時はスプリングを圧縮した状態で閉路しており、事故の場合には回路に直列に入れたコイルで動作されるリンクによって開路する低圧用のリクローザと異なる点である。

この 46 kV リクローザの他の新しい点は保護継電器へ電圧を供給するのにトランジスタを使っていることである。電圧は各コンデンサブッシングから取り出して、トランジスタの回路で増巾される。この増巾器の出力は短絡および接地用 CR 形方向過電流継電器の方向要素の極性コイルに電圧を与える。トランジスタでできたブッシング形の計器用変圧器は全部静止部分で長い寿命を有し、普通の変圧器を不要とする。この計器は保護継電器といっしょに別の屋外形の箱中に収納されている。

(伊丹製作所 亀山三平訳)



46 kV リクローザ

世界でもっとも純粋なシリコン

World's Purest Silicon

(Westinghouse Engineer Vol. 18, No. 1, Jan. 1958, p. 26)

W社の研究者と協同で、ドイツのシーメンス・ハルスケおよびシーメンス・シュツケルトにおいて、不純物含有量が60億分の1という世界でもっとも純粋なシリコンの製造法が完成された。このシリコンを用いて作った単結晶は、600~1,000 Ω の抵抗値と400~800 μ secのライフタイムを持っている。このような単結晶を用いてた装置は、今までのシリコンを用いて作った装置の2~4倍の電圧と出力で動作する。たとえば通常のシリコンを用いたトランジスタは10~15dbの利得で、60V-2Aの定格であるが、このシリコンを用いて試作されたものは同じ利得で300V-20Aの定格である。このシリコンの米国における製造権はW社が獲得した。(研究所 神崎 通訳)

ダイニスタ

(Westinghouse Engineer, Vol. 18, No. 1, Jan. 1958, p. 26)

近年新しい半導体装置の実用化が着々と進んできて、10年前にはほとんど夢想だにしなかった機能をおこなわせることができるようになった。この分野における一番の新顔はダイニスタ・ダイオードである。これはトランジスタのスイッチングの特性と整流体の電力処理能力とによって、電力制御においてすぐれた応用能力をもっている。

この装置の順方向と逆方向の電圧電流特性は普通のダイオードに似ているが、ただ違うところは逆方向に印加される電圧が規定の先頭値をこえると絶縁がやぶれて非常に低い抵抗の状態になることである。このようにして印加電圧の作用によって有効にスイッチング作用を行わせることができる。

350V定格のゲルマニウム・ユニットは10Aまでの連続電流で動作した。パルス条件のもとでは2A定格のダイニスタ・ユニットは5マイクロ秒間に500Aを通した。これらの値はある特定の装置の代表値に過ぎないのであって、250Aまでの連続定格をもつユニットをめざして研究が進められている。

この装置のもっとも興味ある性質の一つは阻止、すなわち高抵抗の状態から、導通すなわち低抵抗の状態に移るスイッチング時間である。この絶縁のやぶれる時間すなわち導通状態にはいる時間は0.1マイクロ秒より短い。ダイニスタを用いた交流電流のスイッチング回路はサイバック入力用として働く1kVAのスイッチングをおこなった。このようにしてダイニスタはリレーと置き換えて用いることができ、その結果可動部分をもたない完全に静的な電力用スイッチング回路が製作される

ことになる。(研究所 清水潤治訳)

タービン発電機の単機出力増加さる

What's New (Westinghouse Engineer, Vol. 18, No. 3, May, 1958, p. 93)

W社では3,600rpmくし形タービン発電機の最大記録が決まった。

この記録品はタービン出力325MW、蒸気圧力2,000psi、蒸気温度1,000°F、再熱温度1,000°F、背圧3.5inchHg、蒸気量2,333,000lb/hである。

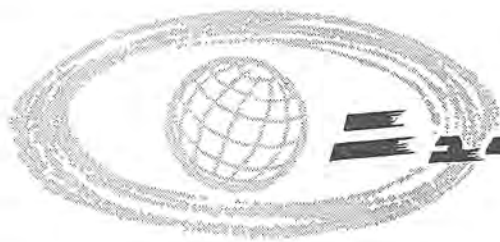
並び形タービン発電機では4分流形の製作経験を有するが、本機は単軸機としては最初の4分流形となる。発電機は内部冷却形で定格は60psigガス圧で422MVA、PF=0.85でタービン同様3,600rpm機として単軸最大容量機である。

本機は1961年Middle South Utilities Systemで運転にはいる予定であるが、これで現在の記録364MVAが改新される。(長崎製作所 加賀貞広訳)

配電用変圧器の耐熱性増強

What's New: Higher Thermal Capability for Distribution Transformers (Westinghouse Engineer, Vol. 18, No. 3, May, 1958, p. 96)

通常の油-紙-ワニス絶縁方式の変圧器で、もっとも弱点となるのは、層間および高低圧間にもちいられる紙である。Insuldurといわれる新しい絶縁方式は、この問題を解決した。新方式は、基本的には、層間絶縁にもちいられる紙に、安定化コンパウンドを加えたものである。セルローズは温度上昇に弱く、しまいには脆弱化する。有機コンパウンドを加えることにより、紙の劣化は非常に減じられる。とくに変圧器が定格負荷以上で使用された場合の温度上昇範囲において、この効果は大きい。有機コンパウンドは、温度の破壊作用を防ぐばかりでなく、さらにセルローズ繊維と化学作用をおこして、紙を強くし、長もちさせる。新しい絶縁の結果、変圧器の動作特性が改善される。すなわち、同一寿命では過負荷に耐え、高い温度上昇を許すことができる。また同一温度上昇に保たれるなら、寿命を長くすることができる。いずれにしても、動作特性を増すことができ、使用上の安全性を一段と増すことになる。この新しい開発により、“弱点”は油およびエナメル許容温度上昇となってきた。(名古屋製作所 木野崎泰三訳)



ニュースフラッシュ

■ 耐塩害用の絶縁階級 200 号

OT 形油入密封式コンデンサブッシング完成

近年塩害防止対策に関して、各方面から問題がとりあげられているが、とくに超高压送電に使用される機器用ブッシングについては、製作上の限界から強力な洗浄以外に対策はないものと考えられていた。

当社において、昨年末より超高压用絶縁階級 200 号の耐塩害用 OT 形油入コンデンサブッシングの試作に着手し、本年 6 月これが完成を見た。

このブッシングは、現在の標準構造である、中心締付方式 (centre clamping type) を採用し、コンデンサ形の特長を十分に生かし、塩害に対してとくに有利なように非常に細長い形状になっている。

これに使用した上部がい管の寸法を示すと下記のとおりである。

全 長	3,600 mm
最大 胴 径	550 mm
最大 立て 径	670 mm
表面漏洩距離	約 8,300 mm

現在各種試験を施行中である。



耐塩害用絶縁階級 200 号
OT 形油入密封式コンデンサブッシング

■ 住友電工向電力ケーブル耐圧試験設備完成

住友電工大阪製作所では、電力ケーブルの需要増加にともなう設備増強の一端として、電力ケーブル耐圧試験設備の新設を計画され、その主要機器は当社伊丹製作所において鋭意製作中であったが、このほど現地すえ付を終り、順調に運転にはいっ

ている。

この試験設備は、被試験物が電力ケーブルであって、静電容量が大きく、高い試験電圧を加えると大きな進相電流が流れるため、必然的に電源の容量を大きくしなければならないが、今回完成の試験設備では、試験用変圧器の一次側に並列に進相電流補償用リアクトルを接続し、負荷の進相電流を打ち消して電源の容量を小さく保ち得るようになっている。

主要な機器は次のとおりである。

(1) 誘導電圧調整器 1 台

単相 60 サイクル 油入自冷式

電圧 3,300 V \pm 100 %

自己容量 250 kVA (1 時間)

電動操作式

(2) 補償用リアクトル 全 5 台

単相 60 サイクル 油入自冷式

端子電圧 6,600 V

容 量 125, 250, 500, 1,000, 2,000 kVA

各 1 時間定格

(3) 補助変圧器 1 台

単相 60 サイクル 油入自冷式

電圧 1,200-2,400-3,600-4,800 V/6,600 V

容量 一次二次とも 1,000 kVA (1 時間)

(4) 試験用変圧器 1 台

単相 60 サイクル 油入自冷式

電圧 一次 6,600 V

二次 350,000 V

電圧測定巻線 350 V

容量 一次二次とも 3,850 kVA (1 時間)

油込総重量 28,000 kg

補償用リアクトルは上表のように 5 種類とし、その組合わせを選定することによって、125 kVA おきに 3,875 kVA まで任意の容量とすることができ、負荷の進相容量が大巾に変わってもつねに完全調整に近い状態で運転することができる。

なお試験電圧が低い場合、その電圧は誘導電圧調整器で調整するが、試験用変圧器はつねに 11 A (1 時間) の電流容量を有するに対して、試験用変圧器一次側に接続されたリアクトルの補償容量は、電圧の自乗に比例して低下するから、このままでは電流容量一ばいの進相負荷をとることができず、非常に不経済な使用法となってしまう。そこでこれを改善するため、上表 (3) のような補助変圧器を用い、線路電圧を昇圧してこれにリアクトルを接続し、リアクトルの補償容量を増加して、つねに電流容量一ばいの負荷をとり得るようにした。補助変圧器の変圧比およびこれに接続するリアクトルの組合わせを適当に選定すれば、種々の電圧階級、形式、長さの電力ケーブルに対して、つねに試験用変圧器の電流容量一ばいまでの耐圧試験を行うことができ、誘導電圧調整器に過負荷することもなく経済的な運

転をすることが可能である。

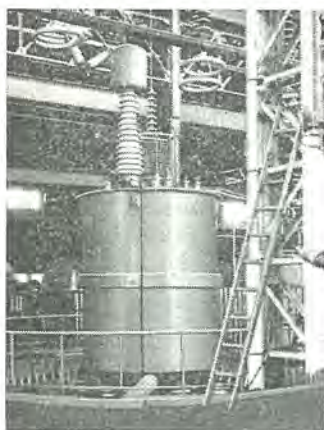
試験用変圧器は単器容量では本邦最大のものであり、しかも特殊な負荷で運転されるから、とくに次のような点に注意して設計したものである。

(1) 誘起電圧波形がひずむことを防ぐため、鉄心の磁束密度をできるだけ低くおさえた。

(2) 容量性負荷をとるため、負荷の静電容量と変圧器の漏洩インダクタンスとが共振状態になれば負荷電流が急増し、変圧器二次端子には非常に危険な電圧が誘起されることになるから、共振周波数をできるだけ高くするよう、変圧器の漏洩インダクタンスを小さくした。

(3) 試料がもし閃絡した場合、変圧器二次端子には衝撃電圧が侵入するため、二次線路端は特殊巻線とし、絶縁を強化した。さらに 600 kV の衝撃電圧試験を行い、これに耐えることを確認している。

なお、将来 380 kV 用など超高压ケーブルの生産が開始された場合、さらに変圧器 1 台を追加して 700 kV まで発生できる装置とする予定であり、そのときには 1 台の変圧器本体は大地に対して 350 kV の絶縁を要するが、このための絶縁架台（荷重 28 t）も今回あわせて製作納入された。



現地で運転中の試験用変圧器の外観

■ 4,500 馬力、6 組の圧延電動機駆動用イグナイトロン整流器完成す

製鉄部門における製品の良質化と均一化、機械の高速化と運転操作の自動化への要望を満足させるべく、モータ駆動用直流電流は最近水銀整流器におきかえられ、その実用性は疑念の余地がなくなった。

今回当社では 4,500 馬力、6 スタンドのホットストリップミル用圧延装置電機品 1 式を八幡製鉄より受注し、これが直流電源として 3,600 kW、750 V、4,800 A、24 タンクの液冷式、密封形イグナイトロン整流器を製作して各スタンドごとに自動制

御を実施した。このイグナイトロンアークの変換装置はその容量だけでなく規模においても最大のものであり、以下これらについてその概要を記述する。

図1 3,600 kW 750 V 4,800 A
24 タンク 液冷式密封形イグ
ナイトロン整流器キュービクル内
部

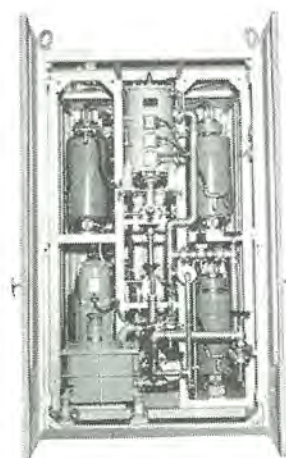


図2 イグナイトロンキュー
ビクル水系



図3 風冷式再冷器

図1は 12 タンクを 1 群としたイグナイトロン整流タンクキュービクルである。図2は閉路循環式水系の配管の一部を示したもので、図3は風冷式再冷器の外観写真である。

1. 駆動電源用イグナイトロンアーク変換装置

定格出力	3,600 kW
定格入力電圧	13,750 V AC
定格出力電圧	750 V DC
定格入力電流	192 A AC
定格出力電流	4,800 A DC
定格周波数	60 サイクル
定格出力制御率	20 %

定格の種類	B 種定格 $\begin{pmatrix} 100\% & \text{連続} \\ 125\% & 2 \text{ 時間} \\ 200\% & 1 \text{ 分間} \end{pmatrix}$
-------	---

2. イグナイトロン整流器

形 式	液冷式、密封形（風冷式再冷器付）
定格負荷	3,600 kW
定格電圧	750 V
定格電流	4,800 A

整流タンク数	24 タンク
総重量	7,260 kg
外形寸法	2,400×1,600×2,650 (高さ) (mm) 2組

3. イグナイトロン整流器用変圧器

内鉄形、相間リアクトル付十二相四重千鳥形結線方式

交流側—三角	直流側—四重千鳥
定格容量	4,570 kVA
定格周波数	60 サイクル
電圧	交流側 13.75 kV 直流側 800 V
絶縁階級	交流側 10 号
総重量	26,800 kg
外形寸法	3,440×3,090×3,920 (mm)

以上の諸装置は多くの特長を有するがそのおもなものを列挙すれば次のとおりである。

- (1) イグナイトロン整流器は 12 相結線であり、各相は陽極遮断器を介して、2 整流タンクにそれぞれ接続されている。
- (2) イグナイトロンアーク変換装置は液冷式、密封形整流タンクで構成され、6 相組合せの制御装置 1 式からなりたっている。
- (3) 整流タンクは閉路循環式の風冷再冷却器付液冷方式である。
- (4) 整流タンクおよび制御盤はすべてキュービクル方式であり、陽極遮断器の動作時も連続運転が可能である。

■ 60 W FK 形小形直流電動機

さきに日本 IBM 社向として 400 W および 200 W FK 形直流電動機 (NEMA 寸法 56 フレーム) を開発納入したが、今回さらに小形な下記仕様の防振タイプ FK 形直流電動機を開発納入した。

仕様

60 W, DC, 115 V, 1,500 rpm 複巻励磁、連続定格

本機は NEMA 寸法 42 フレームを規準として製作したもので、つぎの特長を有している。

1. 防振支持形 (Resilient mount type) であるため、完全にモータの振動を絶縁することができる。
2. スマートでコンパクトな外観である。
3. 給油のいらぬシールドボールベアリングを使用している。



60 W FK 形小形直流電動機

4. ブラシ保持器は取扱の簡単な箱形 (Cartridge type) である。

■ 近畿日本鉄道新鋭特急車「ビスタ・カー」完成 !!

近畿日本鉄道がわが国最初の試みとして新造した豪華な 2 階建展望車をもつ新鋭特急車を去る 6 月中旬完成、好成績をもって試運転をすまし 7 月 11 日から斯界の注視をあびて営業運転にはいった。

McMTcTTcMMc 7 両 1 編成の「ビスタ・カー」の主要電機品は当社製作になるもので、(概略は本誌 2 号ニュース欄参照) 125 kW (340 V) の MB-3020-C 形 WN ドライブ主電動機および 8×125 kW 制御の ABF-178-15MDH 形制御装置は容量において電車の記録品である。(詳細後報)

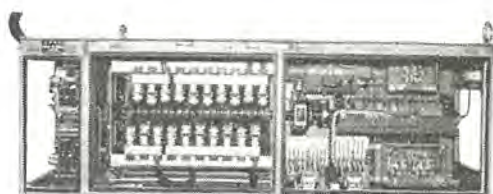


快走中の「ビスタ・カー」



MB-3020-C 形主電動機

1 時間定格 125 kW 340 V 410 A 1,800 rpm



MU-20C-1 形主制御器箱



直 流 送 電 装 置

発明者 阿部久康・山口峯男

直流送電回路においてインバータ側に故障が生じた場合でも、送電端の順変換器側で送電回路の遮断を行うのが常識である。インバータ側の遮断は格子あるいは交流側いずれにせよただちに転流失敗を惹起し直流短絡事故となる。もしインバータ側遮断が実現されれば両変換器間の遠隔制御がいちじるしく簡単化され、直流多端子送電線において選択遮断が可能となり直流送電の利用価値は飛躍的に拡大される。この発明は非常に簡単な手段にてインバータ側での遮断を可能とする新しい直流送

電装置を提供するものである。図1においてインバータ装置(2)側が失弧、転流失敗などで故障して短絡状態となったとすると、端子(4)(5)間の電圧は急激に低下しこの電圧の急変を分圧器(6)に設けられた検出装置(7)により検出し、サイラトロン(8)(9)の格子を正偏倚して通電させリアクトル(3)を短絡する。このサイラトロン(8)(9)の代りに始動用電極を有している放電ギャップを使用してもよい。この直流リアクトル(3)の短絡により、正常運転時に直流電圧で充電された直流線路(1)中の電荷が消弧用リアクトル(3)および短絡状態となったインバータ装置(2)中に放出される。この時の電流は線路容量(10)消弧リアクトル(11)などのリアクタンスにより振動電流となり短絡電流に重畳して流れることとなる。すなわち直流リアクトル(3)を短絡しなければ直流リアクトルの高インダクタンスのため図2に示すように短絡電流は(イ)→(ロ)と漸増していくが、上記のように直流リアクトル(3)を短絡すれば(イ)→(ハ)→(ニ)のように振動電流が短絡電流に重畳し、(ニ)点において零値より反転しようとする。この時インバータ側の通流している水銀整流器の陰極点は消滅し整流器の格子にはすでに負バイアスが与えられているからインバータの短絡電流は遮断される。また、人為的にインバータ側全整流器の格子遮断を行えばインバータは自動的に転流失敗状態となり同時に消弧が行われ、順変換器側の格子遮断によらなくてもインバータ側において直流送電回路を遮断させることができる。

(特許第 230693 号) (葛野記)

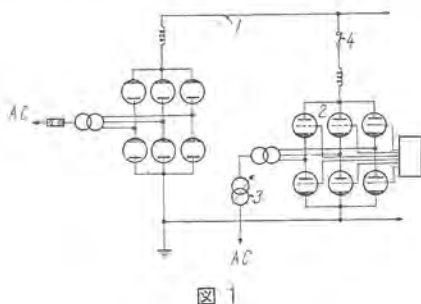


図 1

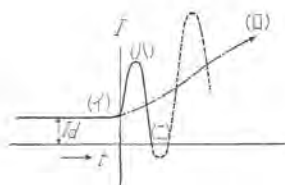


図 2

直流送電装置におけるインバータ遮断方式

発明者 阿 部 久 康

直流送電装置においては直流高圧遮断器の製作が困難であるため、インバータだけ遮断させることはきわめて困難であった。したがって直流回路に分岐回路を設けることができず直流送電の実用性をいっじるしく阻害していた。

この発明は普通の直流遮断器を使用してきわめて簡単にインバータを直流回路から切離す新しい方式を提供したものである。すなわち図において、直流回路(1)よりインバータ(2)を切り離なそうとする場合は、まずインバータ(2)の直流逆起電

力を増加する方向に電圧調整器(3)あるいは水銀整流器の格子制御角を制御し、直流回路(1)よりインバータ(2)への直流電流流入を順次減らしていく。このインバータへの流入電流が零値付近になったら遮断器(4)を開き、インバータ(2)を直流回路(1)より切離す。この際直流遮断器(4)の遮断電流は零値付近であり、また遮断時の接点間の電圧もインバータ(2)の逆起電力が大なるため小で、普通の直流遮断器を使用しても何ら支障がない。インバータ(2)を直流回路(1)に投入する場合は、遮断時の操作と逆行、すなわちインバータの逆起電力を高めておき遮断器(4)を投入し逆起電力を減じていけばよいが、まず遮断器(4)を投入してインバータに直流電圧を印加しインバータ(2)の格子投入により起動することもできる。

なお上記直流遮断器(4)の代りにサイラトロンを使用し、インバータの逆起電力を上昇させることによりインバータへの流入電流を減少させ、この電流に切れ目が生ずるに至りサイラトロンの放電が停止して、自動的にインバータを遮断させるようにしてもよい。

(特許第 239355 号) (葛野記)

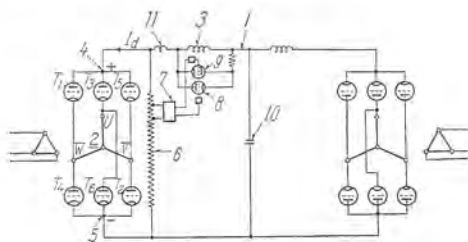


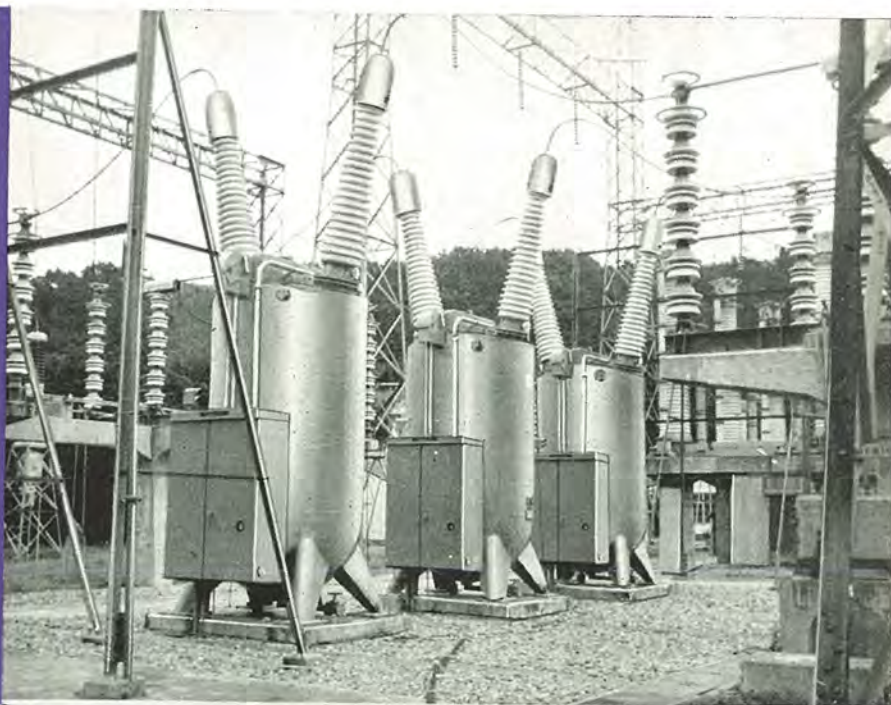
図 1

関西電力新愛本変電所納

287.5kV節油タンク形遮断器

定 格

形名	250-GW-500 T
定格電圧	287.5 kV
定格電流	800 A
定格遮断容量	5,000 MVA
定格遮断時間	3 サイクル
標準動作責務	O-0.3 秒 CO 1 分-CO
重量(油なし)	29,400 kg
油量	29,400 l



さきに 287.5 kV 節油タンク形遮断器 4 台が関西電力枚方変電所に納入され、良好な運転実績をあげているが、このたび同じ定格の 1 台が新愛本変電所に納入された。同変電所では電圧上昇がとくにはなほだしいために、330 kV で、充電々流無再点弧遮断が要求されているので、標準の 287.5 kV 遮断器より遮断点を多くして 8 点切としてある。去る 7 月 5 日 6 日にわたって現地において充電々流および励磁電流の遮断試験が行われ、優秀な成績を収めた。

昭和 33 年 9 月 1 日 印刷

昭和 33 年 9 月 8 日 発行

「禁無断転載」 定価 1 部 金 100 円 (送料別)

雑誌「三菱電機」編集委員会

委員長	大久保謙	常任委員	宗村精二	平二
副委員長	石川辰雄	委 員	岡進藤	和彦
常任委員	浅井徳次郎	"	立原芳真	隆一
"	荒井安藤	"	竹内村	又
"	安木武雄	"	津松尾	
"	小堀富次郎	"	松	
"	高井得一郎	幹 事	井上八郎	
"	中野光雄	"	市村宗	
"	馬場文夫			
"	松田新栄			
"	山田栄一			

(以上 50 音順)

編集兼発行人	東京都千代田区丸の内 2 丁目 3 番地	市 村 宗 明
印 刷 所	東京都新宿区市谷加賀町 1 丁目	大日本印刷株式会社
印 刷 者	東京都新宿区市谷加賀町 1 丁目	長 久 保 慶 一
発 行 所	三菱電機株式会社内	「三菱電機」編集部
		電話 和田倉 (20) 1631
	日本出版協会会員番号 213013	
発 売 元	東京都千代田区神田錦町 3 の 1	株式会社オーム社書店
		電話 (29) 0915・0916 振替東京 20018