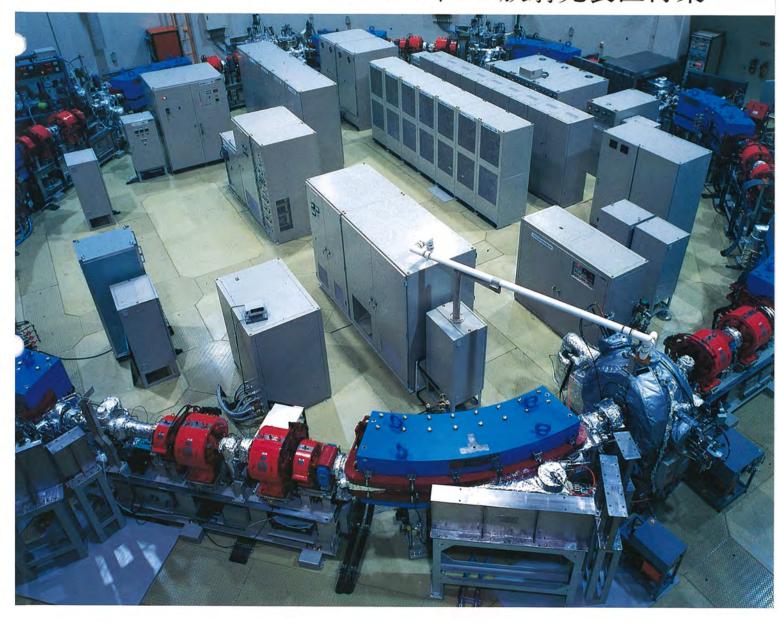
MITSUBISHI 三菱電機技報



MITSUBISHI DENKI GIHO Vol.65 No.11

シンクロトロン放射光装置特集



三菱電機技報

Vol. 65 No. 11 1991

シンクロトロン放射光装置特集

目 次

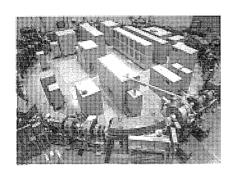
シンクロトロン放射光装置特集に寄せて — 光は東方より — … 1 石井武比古
放射光源技術の現状と動向
三菱電機と放射光装置······9 森川鐵也・岩本雅民・河村博敏
(株)ソルテック 1 GeV 放射光装置・・・・・・・13 淺井脩次・中村史朗・高仲政雄・阿刀田伸史・冨増多喜夫ほか
大型放射光施設 SPring-8 の計画と開発19 横溝英明・熊原忠士・熊谷教孝・和田 雄・津田元裕・神代哲哉
シンクロトロン放射光装置の研究試作・・・・・28 中西哲也・奥田荘一郎・中村史朗・山田忠利・岩本雅民
放射光装置用高性能ライナック·······34 塩田 勝
放射光装置用電磁石と電源・・・・・・38 久野和雄・福本信太郎・寺本昭好・松村 寧・三田村政則
放射光装置用超高真空技術と高周波加速空洞技術・・・・・・
円型加速器のラティス設計ツール······48 吉田克久・山本雄一
電磁界解析とビーム シミュレーション・・・・・54 奥田荘一郎・中田修平・田中博文・山本俊二・板垣秀信・池上和律
自由電子レーザの基本技術・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
普通論文
大阪府水道部納め送水管理システム・・・・・・・・・・66 吉原秀樹・小数賀嘉男・野中忠彦・後藤隆久
西武鉄道㈱向け運行管理システム (SEMTRAC)
月岡誠治・岩井 昇・舘 精作・村木一巳・浅野和彦 中間踊り場付き超高揚程エスカレーター78
月岡誠治・岩井 昇・舘 精作・村木一巳・浅野和彦 中間踊り場付き超高揚程エスカレーター 78 斉藤良一・治田康雅・岩田明夫・吉川達也 85
月岡誠治・岩井 昇・館 精作・村木一巳・浅野和彦 中間踊り場付き超高揚程エスカレーター 78 斉藤良一・治田康雅・岩田明夫・吉川達也 90 mm 書換え形光ディスク装置 85 中根和彦・小川雅晴・小倉 学・吉本恭輔・清瀬泰広・古川輝雄 《MELCOM 80》オフィスコンピュータ用"三菱販売情報システム" 91
月周誠治・岩井 昇・館 精作・村木一巳・浅野和彦 中間踊り場付き超高揚程エスカレーター 78 斉藤良一・治田康雅・岩田明夫・吉川達也 90 mm 書換え形光ディスク装置 85 中根和彦・小川雅晴・小倉 学・吉本恭輔・清瀬泰広・古川輝雄 《MELCOM 80》オフィスコンピュータ用"三菱販売情報システム" 91 菊地 寿・喜多村重昭・西崎 亨・佐藤正昭・中 俊二 家庭用燃焼器の低 NO _X 化 97
月岡誠治・岩井 昇・館 精作・村木一巳・浅野和彦 中間踊り場付き超高揚程エスカレーター 78 斉藤良一・治田康雅・岩田明夫・吉川達也 90 mm 書換え形光ディスク装置 85 中根和彦・小川雅晴・小倉 学・吉本恭輔・清瀬泰広・古川輝雄 《MELCOM 80》オフィスコンピュータ用"三菱販売情報システム" 91 菊地 寿・喜多村重昭・西崎 亨・佐藤正昭・中 後二 家庭用燃焼器の低 NO _X 化 97 相本照男・小関秀規・佐藤 稔・矢嶋大三・小木曽明男 高速ポストスクリプト互換インタプリタ 102
月岡誠治・岩井 昇・館 精作・村木一巳・浅野和彦 中間踊り場付き超高揚程エスカレーター 78 斉藤良一・治田康雅・岩田明夫・吉川達也 85 90 mm 書換え形光ディスク装置 85 中根和彦・小川雅晴・小倉 学・吉本恭輔・清瀬泰広・古川輝雄 85 (MELCOM 80)オフィスコンピュータ用"三菱販売情報システム" 91 菊地 寿・喜多村重昭・西崎 亨・佐藤正昭・中 俊二 家庭用燃焼器の低 NOx 化 97 椙本照男・小関秀規・佐藤 稔・矢嶋大三・小木曽明男 高速ポストスクリプト互換インタプリタ 102 田村正司・斎藤雅行・的場成浩・大西 勝 並列推論マシン (PIM/m)用 VLSI 106 古谷清広・安田憲一・町田浩久・安藤秀樹・武田保孝・中島 浩 106
中間踊り場付き超高揚程エスカレーター 78 育藤良一・治田康雅・岩田明夫・吉川達也 90 mm 書換え形光ディスク装置 85 中根和彦・小川雅晴・小倉 学・吉本恭輔・清瀬泰広・古川輝雄 (MELCOM 80)オフィスコンピュータ用"三菱販売情報システム" 91 菊地 寿・喜多村重昭・西崎 亨・佐藤正昭・中 俊二 家庭用燃焼器の低 NO _X 化 97 椙本照男・小関秀規・佐藤 稔・矢嶋大三・小木曽明男 高速ポストスクリプト互換インタプリタ 102 田村正司・斎藤雅行・的場成浩・大西 勝 並列推論マシン (PIM/m)用 VLSI 106 古谷清広・安田憲一・町田浩久・安藤秀樹・武田保孝・中島 浩
月岡誠治・岩井 昇・館 精作・村木一巳・浅野和彦 中間踊り場付き超高揚程エスカレーター 78 斉藤良一・治田康雅・岩田明夫・吉川達也 85 90 mm 書換え形光ディスク装置 85 中根和彦・小川雅晴・小倉 学・吉本恭輔・清瀬泰広・古川輝雄 85 (MELCOM 80)オフィスコンピュータ用"三菱販売情報システム" 91 菊地 寿・喜多村重昭・西崎 亨・佐藤正昭・中 俊二 家庭用燃焼器の低 NOx 化 97 椙本照男・小関秀規・佐藤 稔・矢嶋大三・小木曽明男 高速ポストスクリプト互換インタプリタ 102 田村正司・斎藤雅行・的場成浩・大西 勝 並列推論マシン (PIM/m)用 VLSI 106 古谷清広・安田憲一・町田浩久・安藤秀樹・武田保孝・中島 浩 106
月岡誠治・岩井 昇・館 精作・村木一巳・浅野和彦中間踊り場付き超高揚程エスカレーター 斉藤良一・治田康雅・岩田明夫・吉川達也78 斉藤良一・治田康雅・岩田明夫・吉川達也90 mm 書換え形光ディスク装置 中根和彦・小川雅晴・小倉 学・吉本恭輔・清瀬泰広・古川輝雄85 中根和彦・小川雅晴・小倉 学・吉本恭輔・清瀬泰広・古川輝雄(MELCOM 80)オフィスコンピュータ用"三菱販売情報システム" 菊地 寿・喜多村重昭・西崎 亨・佐藤正昭・中 俊二91 菊地 寿・喜多村重昭・西崎 亨・佐藤正昭・中 俊二家庭用燃焼器の低 NOx 化 相本照男・小関秀規・佐藤 稔・矢嶋大三・小木曽明男 高速ポストスクリプト互換インタプリタ 田村正司・斎藤雅行・的場成浩・大西 勝102 田村正司・斎藤雅行・的場成浩・大西 勝並列推論マシン (PIM/m)用 VLSI 古谷清広・安田憲一・町田浩久・安藤秀樹・武田保孝・中島 浩106 古谷清広・安田憲一・町田浩久・安藤秀樹・武田保孝・中島 浩
中間踊り場付き超高揚程エスカレーター 78 斉藤良一・治田康雅・岩田明夫・吉川達也 85 中根和彦・小川雅晴・小倉 学・吉本恭輔・清瀬泰広・古川輝雄 (MELCOM 80)オフィスコンピュータ用"三菱販売情報システム" 91 菊地 寿・喜多村重昭・西崎 亨・佐藤正昭・中 俊二 家庭用燃焼器の低 NO _X 化 97 椙本照男・小関秀規・佐藤 稔・矢嶋大三・小木曽明男 高速ポストスクリプト互換インタプリタ 102 田村正司・斎藤雅行・的場成浩・大西 勝 並列推論マシン (PIM/m)用 VLSI 106 古谷清広・安田憲一・町田浩久・安藤秀樹・武田保孝・中島 浩 113 荷電粒子装置 114 スポットライト EMC (輻射ノイズ)対策用フェライトコア"1ターンデバイス" 111
中間踊り場付き超高揚程エスカレーター 78 育藤良一・治田康雅・岩田明夫・吉川達也 90 mm 書換え形光ディスク装置 85 中根和彦・小川雅晴・小倉 学・吉本恭輔・清瀬泰広・古川輝雄 (MELCOM 80)オフィスコンピュータ用"三菱販売情報システム" 91 菊地 寿・喜多村重昭・西崎 亨・佐藤正昭・中 俊二 家庭用燃焼器の低 NO _X 化 97 椙本照男・小関秀規・佐藤 稔・矢嶋大三・小木曽明男 高速ポストスクリプト互換インタプリタ 102 田村正司・斎藤雅行・的場成浩・大西 勝 並列推論マシン (PIM/m)用 VLSI 106 古谷清広・安田憲一・町田浩久・安藤秀樹・武田保孝・中島 浩 113 荷電粒子装置 1114 スポットライト

表紙

シンクロトロン放射光装置

(㈱ソルテックの筑波研究所に設置された1GeV シンクロトロン放射光装置用電子蓄積リング(SR リング)の全景写真である。

この装置は、運転開始後1か月で蓄積電流200 mA、運転開始1年半後には常識を覆す200 mAで寿命が50時間という画期的な成果を達成した。写真の右側が電子ビームの入射部、手前に高周波空洞、写真奥から左側にかけて複数の放射光取り出し用ビームラインが備えられている。リングの直径は約15 m。



三菱電機技報に掲載の技術論文では, 国際単位"SI"[SI 第2段階(換算値方式) を基本]を使用しています。

ただし,保安上,安全上等の理由で, 従来単位を使用している場合があります。

アブストラクト

放射光源技術の現状と動向

冨増多喜夫

三菱電機技報 Vol. 65 · No. 11 · P 2~8

三菱電機が幹事会社として製作取りまとめを行った㈱ソルテックの1 GeV 放射光装置はすべてが順調にしかも予想以上の成果が得られ、運転開始後1か月で蓄積電流200mA、運転開始1年半後には常識を覆す200mAで寿命50時間という画期的な成果を達成した。本稿ではこのようなブレークスルーが可能となった技術的背景を含めて放射光装置技術の現状と今後の動向を紹介する。

放射光装置用高性能ライナック

塩田 勝

三菱電機技報 Vol. 65 · No. 11 · P 34~37

放射光の利用研究が国内で活発となり, 諸研究機関, 企業で放射光施 設の建設, 建設計画が盛んになっている。

この機会に、放射光施設の入射器としてのライナックを当社の30余年の歴史を技術面で振り返り、現有技術の習得の歴史及び今後の技術上のブレークスルーポイントの洗い出しを行った。

三菱電機と放射光装置

森川鐵也・岩本雅民・河村博敏

三菱電機技報 Vol. 65 · No. 11 · P 9~12

当社は研究用及び医療・工業用の加速器である電子ライナックと,物理実験を主用途とした高精度の常電導及び超電導電磁石を多数製作してきた。これらの製作技術をもとに,近年,物性研究のための高輝度光源としての大型放射光装置及び半導体製造装置用光源としてその応用が期待される小型放射光装置に対し,システム全体を提供すべく,研究所,製作所等関連部門が一体となって独自の開発を進めてきている内容の概要を紹介する。

放射光装置用電磁石と電源

久野和雄・福本信太郎・寺本昭好・松村 寧・三田村政則 三菱電機技報 Vol. 65・No. 11・P 38~42

当社では、放射光装置その他の加速器用電磁石及び電源の開発・製作を、主に神戸製作所が担当している。近年、これらの需要は、研究所主体の国家プロジェクトから民間へと拡大し、単品の受注生産からシステムの総合性能保証が求められつつある。これらの要求にこたえるため、積層型電磁石やシンクロトロン用電源等の製品において従来技術の高度化を目指し、要素技術の開発及びシステム化を推進中であり、これらの現状について紹介する。

(株)ソルテック 1 GeV 放射光装置

淺井脩次・中村史朗・髙仲政雄・阿刀田伸史・冨増多喜夫ほか 三菱電機技報 Vol. 65・No. 11・P 13~18

この装置は放射光の次世代半導体のリソグラフィへの応用を目的とした研究用光源である。フルエネルギー入射方式、常電導磁石方式を採用したシステム構成とし、超高真空・高周波加速・高磁場精度高安定度電源・高精度アライメント等必要な性能が得られるよう構成機器の設計製作を行った。この結果、ビーム調整開始後わずか3か月で1 GeV、200mA、ビーム寿命4hの目標性能が得られた。現在はビーム寿命50h以上で安定に運転されている。

放射光装置用超高真空技術と高周波加速空洞技術

土舘裕幸・溝端正隆・来島裕子・飯田利昭・椋木 健 三菱電機技報 Vol. 65・No. 11・P 43~47

放射光装置の蓄積リングで必す(須)の技術である超高真空技術と高周波加速空洞技術に関して、現在までに開発した成果と、(㈱ソルテック SR 装置設計・製作で実施した技術に関して概述した。同装置の現地でのビーム運転を通して得られた真空特性・ビーム寿命・捕そくイオンの効果についても併せて記した。

大型放射光施設 SPring-8 の計画と開発

横溝英明·熊原忠士·熊谷教孝·和田 雄·津田元裕·神代哲哉 三菱電機技報 Vol. 65·No. 11·P 19~27

大型放射光施設は、8GeV のエネルギーを持つ入射器・蓄積リングからなり、高輝度・短波長の放射光を発生する挿入光源装置を多数持つ次世代型の最先端研究施設で、1998年度共同利用開始予定で建設中である。同施設の主要機器である四極・六極電磁石の研究・開発のため試作機を製作した。同施設の制御系はマルチ ドロップ方式で検討中である。JSRは同施設建設上必要な研究開発を目的として日本原子力研究所に建設された小型電子蓄積リングで稼働中である。

円型加速器のラティス設計ツール

吉田克久・山本雄一

三菱電機技報 Vol. 65·No. 11·P 48~53

曲率半径の小さな偏向電磁石の粒子に対する非線形作用が正しく取り扱えるラティス設計コードを開発し、その使用例として高輝度の小型放射光装置のラティス設計を行った。このコード開発により、広範囲な大きさの円型加速器の設計が効率的に行えるようになった。今回設計した放射光装置は、周長が30.5m で偏向電磁石の曲率半径が2.4m の常電導型 1GeV 加速・蓄積兼用リングである。

シンクロトロン放射光装置の研究試作

中西哲也・奥田荘一郎・中村史朗・山田忠利・岩本雅民 三菱電機技報 Vol. 65・No. 11・P 28~33

シンクロトロン放射光装置が当社中央研究所 西部基礎研究棟に建設されている。この装置は20MeV ライナック、1GeV 常電導シンクロトロン及び800MeV 超電導小型蓄積リングからなる。この装置の目的は、装置の研究試作を通して装置技術を開発し、放射光を用いたリソグラフィや物質構造解析、高エネルギービーム応用等に利用することである。シンクロトロンは既にビーム加速に成功し、現在超電導小型蓄積リングを建設中である。

電磁界解析とビーム シミュレーション

奥田荘一郎·中田修平·田中博文·山本俊二·板垣秀信·池上和律三菱電機技報 Vol. 65·No. 11·P 54~58

放射光装置及びその入射装置の加速器を設計するために必要な電磁界解析及びビームシミュレーションについて論じる。電磁界解析に関しては磁界解析、電界解析、渦電流解析及び高周波解析があり、従来の二次元解析だけでなく、三次元解析ができるようになっている。ビームシミュレーションでは、従来、解析が難しかった励起場及び不安定性の解析法を開発した。また、超電導電磁石を用いた放射光装置のビームトラッキング技術を確立した。

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 65, No. 11, pp. 34~37 (1991)

A High-Performance Linear Accelerator for Synchrotron Radiation Sources

by Masaru Shiota

Many Japanese research organizations and corporations are either building or planning synchrotron radiation source facilities as research in the promising field of synchrotron radiation applications grows in popularity. The article reviews the corporation's more than 30 years' experience with linear accelerators, considering their suitability for synchrotron injectors, and assessing achievements and inadequacies of current technology.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 65, No. 11, pp. 38~42 (1991)

Electromagnets and Power Supplies for Synchrotron Radiation Equipment

by Kazuo Kuno, Shintaro Fukumoto, Akiyoshi Teramoto, Yasushi Matsumura

The corporation's Kobe Works has been primarily responsible for development and production of electromagnets and power supplies for synchrotrons and other accelerators. The source of orders for this equipment is moving from government projects at research laboratories to commercial ventures of private enterprises. The orders themselves are shifting from individual components to commissioned systems. The report introduces basic technology development and system integration work for improving the corporation's technology in areas of laminated electromagnets and power supplies for synchrotron use.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 65, No. 11, pp. 43~47 (1991)

Ultrahigh-Vacuum and Acceleration Cavity Technology for Synchrotron Radiation Equipment

by Hiroyuki Tsuchidate, Masataka Mizobata, Yuko Kijima, Toshiaki lida & Ken Mukugi

The article reports on previous milestones in ultrahigh-vacuum and acceleration cavity technology for synchrotron storage rings, and the technological developments applied to construct the Sortec synchrotron radiation facility. It includes data on vacuum characteristics, beam life, and captive ion effects measured during beam operation.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 65, No. 11, pp. 48~53 (1991)

A Design Tool for Circular Particle Accelerators

by Katsuhisa Yoshida & Yuichi Yamamoto

The authors have developed a lattice design code that correctly accounts for the nonlinear particle-deflection behavior of deflection electromagnets having a small radius of curvature. The code has been used to design the lattice of a compact, high-intensity, low-emittance ring that operates in acceleration and storage modes. The synchrotron ring design developed has a 30.5m circumference and deflection magnets with a 2.4m radius of curvature. The technique enables the rapid design of circular particle accelerators having a wide range of sizes.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 65, No. 11, pp. 54~58 (1991)

Electromagnetic Field Analysis and Beam Simulation

by Soichiro Dkuda, Shuhei Nakata, Hirofumi Tanaka, Shunji Yamamoto, Hidenobu Itagaki & Kazunori Ikegami

The authors discuss electromagnetic field analysis and beam simulation for a synchrotron radiation source and its injection accelerator. Field analysis methodology covers magnetic, electric, eddy-current and high-frequency related phenomena. Three-dimensional analysis, as well as conventional planar analysis, was made possible. The authors developed; 1) beam simulation techniques that enable the analysis of excitation fields and beam instability problems, and 2) a beam-tracking program for a synchrotron radiation source employing superconducting magnets.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 65, No. 11, pp. 2~8 (1991)

The Present Status and Future Trends in Synchrotron Radiation Sources

by Takio Tomimasu

Mitsubishi Electric was the chief contractor for Sortec Corporation's 1GeV synchrotron radiation apparatus, which has performed reliably and well beyond expectations. Currents up to 200mA were achieved within just one month of startup. After 18 months of operation, a 200mA current with an unprecedented lifetime of 50 hours was achieved. The article introduces the current status and future trends in synchrotron radiation technology, including discussion of these important breakthroughs.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 65, No. 11, pp. 9~12 (1991)

Mitsubishi Electric Synchrotron Radiation Sources

by Tetsuya Morikawa, Masatami Iwamoto & Hirotoshi Kawamura

Mitsubishi Electric has gained experience from many years of manufacturing electron linear accelerators for research, medical and industrial use, as well as high-precision conventional and superconducting magnets. This experience is now being utilized by the corporation's research and manufacturing divisions to jointly develop two complete systems of original design. One system will use a large-scale X-ray source for research in solid-state physics and molecular analysis. The other is a system to provide a compact X-ray source for applications anticipated in semiconductor production.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 65, No. 11, pp. 13~18 (1991)

Sortec Corporation's 1GeV Synchrotron Radiation Source

by Dsatsugu Asai, Shiro Nakamura, Masao Takanaka, Nobufumi Atoda & Takio Tomimasu

The Sortec research facility is utilizing a synchrotron radiation source for applications towards next-generation lithography processes for semiconductor devices. The apparatus employs conventional magnets and operates with full-energy injection. The key components were designed and produced to satisfy the stringent requirements of ultrahigh-vacuum, RF acceleration, precision magnetic-field power supply, and stable and accurate component alignment. As a result of careful work in these areas, apparatus design specifications were achieved —200mA beam at IGeV with a 4h lifetime—just three months after commissioning. At present, the apparatus is operating stably with a beam lifetime of 50 hours.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 65, No. 11, pp. 19~27 (1991)

Construction Plans for SPring-8, a Large Synchrotron Radiation Facility, and Related Developments

by Hideaki Yokomizo, Tadashi Kumahara, Noritaka Kumagai, Takeshi Wada, Motohiro Tsuda & Tetsuya Kojiro

SPring-8, an 8GeV synchrotron radiation facility to produce high-intensity, short-wavelength ($\sim\!0.1 \mathrm{nm}$) radiation using multiple insertion devices, is currently under construction. The facility will be completed in 1998, when it will begin use by the academic and industrial community. Mitsubishi Electric has built prototypes of the quadrupole and sextupole magnets for the main ring. The control system is also being studied, with controller and devices connected in a multi-drop scheme. Research and development for the SPring-8 was carried out using the JSR, a smaller electron storage ring built for the Japan Atomic Energy Research Institute. Mitsubishi Electric was the primary contractor.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 65, No. 11, pp. $28 \sim 33$ (1991)

Synchrotron Radiation Source Development

by Tetsuya Nakanishi, Soichiro Dkuda, Shiro Nakamura, Tadatoshi Yamada & Masatami Iwamoto

The corporation is constructing a synchrotron radiation facility at its Central Research Laboratory. The equipment consists of a 20MeV linear accelerator, a IGeV synchrotron using conventional electromagnets, and a compact 800MeV storage ring using superconducting magnets. This equipment will be used for developing synchrotron and storage ring technologies, research on X-ray lithography and material analysis using synchrotron radiation, and applications requiring highenergy beams. The synchrotron, already complete, has accelerated beams to IGeV. Construction of the superconducting storage ring is underway.

アブストラクト

自由電子レーザの基本技術

佐藤信二・八十島義行・中田修平・築島千尋・奥田荘一郎 三菱電機技報 Vol. 65・No. 11・P 59~65

自由電子レーザは、相対論的エネルギーをもつ電子ビームが周期磁場中で発生するシンクロトロン放射光と電子ビーム自身が共鳴的な相互作用をすることにより、レーザ発振を行うものである。電子ビーム源としては電子蓄積リングやライナックが用いられる。

自由電子レーザの基礎技術を確立するために、電子ビームと電磁場の 挙動を解析するシミュレーション技術と電子ビームや周期磁場の計測・ 制御技術の開発を行った。

大阪府水道部納め送水管理システム

吉原秀樹・小数賀嘉男・野中忠彦・後藤隆久 三菱電機技報 Vol. 65・No. 11・P 66~72

大規模広域化した大阪府水道送水施設の一元的な管理運用のために、PCM 多重無線設備、情報伝送設備、監視制御設備等を納入した。このシステムは、ポンプ場12か所を始めとする主要水道施設、無線中継所など計22か所のデータをセンター(村野局)に集中する情報伝送装置を中核に、センターのマンマシン インタフェース装置等で構成され、高信頼度化した情報伝送や監視操作卓での漢字 EL 表示など、水道集中管理分野における最新技術を導入した。

西武鉄道(株)向け運行管理システム(SEMTRAC)

月岡誠治・岩井 昇・舘 精作・村木一巳・浅野和彦 三菱電機技報 Vol. 65·No. 11·P73~77

SEMTRAC は光ファイバを用いた分散形システムである。総計150km の池袋線・新宿線二つのシステムを構成している。ダイヤ管理ほか13の機能を持つが、ダイヤ管理・運転整理・案内制御・進路制御・運転情報 伝送の各機能において、制御対象路線の特色を生かしたきめの細かい制御を行っている。この論文では、システムの構成と機能を中心に SEMT RAC の全ぼうを述べる。

中間踊り場付き超高揚程エスカレーター

斉藤良一・治田康雅・岩田明夫・吉川達也 三菱電機技報 Vol. 65 · No. 11 · P 78~84

踏み段走行路の途中に水平走行部分を設けた中間踊り場付きで、揚程42mの超高揚程エスカレーターを納入した。中間踊り場付きとすることにより、新たなレイアウトが生まれるとともに、超高揚程化に伴う乗客の不安感が解消できる。今回、超高揚程化に伴う技術課題である始動方式・各駆動ユニットの負荷分担・手すりとステップの速度同期性、また踊り場付きに伴った手すり外れ対策・ステップの脈動現象などについて検討し、製品化した。

90mm 書換え形光ディスク装置

中根和彦・小川雅晴・小倉 学・吉本恭輔・清瀬泰広・古川輝雄 三菱電機技報 Vol. 65・No. 11・P 85~90

パソコン等の小型情報機器の外部記憶装置用に小型軽量・大容量の90mm 書換え形光ディスク装置を開発した。3.5インチのハーフハイトサイズでコントローラも内蔵する。ISO 規格案準拠の光ディスク媒体を使用し、記憶容量は127M バイト/枚である。ディスク回転数3,000r/min の高速データ記録、平均シーク時間42ms 以下の高速アクセスを実現、ホストインタフェースに SCSI-2 規格を採用し、5.3M バイト/秒の高速データ転送を行う。

《MELCOM80》オフィスコンピュータ用"三菱販売情報システム" 菊地 寿・喜多村重昭・西崎 亨・佐藤正昭・中 俊二 三菱電機技報 Vol. 65・No. 11・P 91~96

《MELCOM80》オフィスコンピュータの流通ソフトウェア(M-LINKAG E)として、卸売業界の基幹業務である販売管理業務をシステム化した "三菱販売情報システム"を開発した。

このシステムは、卸売業界のジャスト イン タイムの物流や、企業における戦略的情報システム (SIS) の構築を支援するとともに、企業によって異なる業務形態にも柔軟に対応できるよう設計された製品である。

家庭用燃焼器の低 NOv 化

椙本照男・小関秀規・佐藤 稔・矢嶋大三・小木曽明男 三菱電機技報 Vol.65·No.11·P97~101

当社家庭用燃焼器の低 NO_X 化を行った。燃焼による NO_X 生成機構を整理し、その低減手段を検討した。その結果、石油ファンヒーターでは輻射体の火炎中への挿入により、また石油《クリーンヒーター》では二段燃焼の採用により、一酸化炭素(CO)の排出などの安全性を損ねることなく、従来に比べてそれぞれ約30%、約40%の NO_X の低減が図れた。これらの成果は平成 3 年度の各製品に搭載されており、低公害な家庭用暖房機が提供できた。

高速ポストスクリプト互換インタプリタ

田村正司・斎藤雅行・的場成浩・大西 勝 三菱電機技報 Vol. 65·No. 11·P 102~105

日本語ポストスクリプト (Post Script: PS) 対応モノクロ/カラープリンタ用コントローラを開発した。このコントローラは、32ビット RISC プロセッサと、同 RISC 用に最適化が図られている PS 互換ソフトウェアを採用している。また、RISC 及びプリンタ制御用の MC68000の二つの CPU から構成されており、従来の製品の3~5倍程度高速な印字制御を行う。これは当社製サーマルカラープリンタG370に接続することができる。

並列推論マシン(PIM/m)用 VLSI

古谷清広・安田憲一・町田浩久・安藤秀樹・武田保孝・中島 浩 三菱電機技報 Vol. 65・No. 11・P 106~110

第五世代コンピュータ プロジェクトの一環として開発中の並列推論マシン (PIM/m) は、中規模の並列推論マシンの Multi-PSI の後継機である。今回、要素プロセッサ (PE) を構成するプロセッサ ユニット、キャッシュユニット、通信制御ユニットを各々セルベース方式で VLSI 化することによって、Multi-PSI の 4 倍の実装密度と、1PE 当たり 1.4 M LIPS (Multi-PSI の 3 倍以上)の推論速度を実現した。

Abstracts

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 65, No. 11, pp. 91-96 (1991)

The Mitsubishi Sales Information System: An Application Program for MELCOM-80 Small-Business Computer Systems

by Hisashi Kikuchi, Shigeaki Kitamura, Toru Nishizaki, Masaaki Sato & Toshiji Naka

The corporation has developed a sales management application for wholesaling operations that runs on MELCOM-80 small-business computers. The software has functions that support "just-in-time" physical distribution and development of strategic information systems (SIS) for businesses, with the flexibility to adapt to the various operations methodologies of different industries. The new application program is part of the M-LINKAGE, business software series for the MELCOM-80.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 65, No. 11, pp. 97~101 (1991)

NOx Reduction in Home-Use Burners

by Teruo Sugimoto, Hidenori Koseki, Minoru Sato, Oaizo Yajima & Akio Ogiso

The authors have developed a method to reduce the NOx emissions of home-use burners. They reviewed mechanisms of NOx generation in combustion processes and investigated methods to reduce it. The studies revealed that by placing a heat radiator in the flame of a kerosene "Fan Heater," NOx emission was reduced by approximately 30%. Also revealed was that employing two-stage combustion in the kerosene "Clean Heater", NOx emissions were reduced approximately 40%. Neither method results in a significant increase in CO generation that could affect product safety. These developments have been incorporated in to the 1991 product line.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 65, No. 11, pp. 102~105 (1991)

A High-Performance Postscript Compatible Interpreter

by Masashi Tamura, Masayuki Saito, Narihiro Matoba & Masaru Dnishi

The authors have developed a controller for monchrome and color printers that is compatible with the Japanese version of Postscript. The controller is implemented as a dual-processor system consisting of a 32-bit RISC processor running optimized code for a Postscript interpreter, and an MC68000 processor that handles printer control. The controller, which supports printing speeds three to five times faster than previous Postscript interpreters, is intended for connection to the Mitsubishi G370 thermal color printer.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 65, No. 11, pp. 106~110 (1991)

A VLSI Chip Set for the PIM/M Parallel Inference Machine

by Kiyohiro Furutani, Ken' ichi Yasuda, Hirohisa Machida, Hideki Ando, Yasutaka Takeda & Hiroshi Nakashima

The PIM/M parallel inference machine is a successor to the medium-capacity parallel inference machine, Multi PSI, developed under Japan's Fifth-Generation Computer Project. A cell-based VLSI chip set, for use in each of the PIM/M processing units, including a processor unit, cache unit and network controller, has been developed. The result is a processing element density four times that of the Multi PSI. Each processor unit performs 1.4-million inferences per second, three times the inference performance of the Multi PSI.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 65, No. 11, pp. $59\sim65$ (1991)

Simulations and Experiments for a Free-Electron Laser

by Shinji Sato, Yoshiyuki Yasojima, Shuhei Nakata, Chihiro Tsukishima & Soichiro Okuda

Theoretical studies suggest that oscillation of a free-electron laser can be achieved via the resonant interaction of relativistic electron beams and synchrotron radiation generated in the magnetostatic field wiggler. An electron storage ring or linear accelerator can be used as the electron beam source. The authors have developed simulation codes to analyze the behavior of the electron beams and electromagnetic fields in the wiggler. Futhermore, they have constructed a far-infrared free-electron laser based upon a 20MeV electron linear accelerator. Preliminary experiments for oscillation have been performed using this free-electron laser.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 65, No. 11, pp. 66~72 (1991)

A Water Distribution Control System Delivered to Osaka Prefecture

by Hideki Yoshihara, Yoshio Osuga, Tadahiko Nonaka & Takahisa Goto

The corporation has delivered PCM multiplex wireless radio equipment, copper wire data-transmission equipment, and supervision and control equipment to Osaka Prefecture for the central management of its widely distributed water-supply facilities. The Murano Office operates as the prefecture's control center, where the system is organized around user-interface and data-transmission equipment. The contol center gathers information from 22 wireless repeater stations installed at 12 pumping stations and other main facilities. The state-of-the-art system features high-reliability data transmission and kanji-capable electroluminescent display panels at the monitoring desk.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 65, No. 11, pp. 73~77 (1991)

SEMTRAC Traffic Computer Systems Delivered to Seibu Railway Corporation

by Seiji Tsukioka, Noboru Iwai, Seisaku Tate, Kazumi Muraki & Kazuhiko Asano

SEMTRAC employs a distributed architecture and uses optical fiber links. Its two systems cover the 150km of track comprising the Seibu Shinjuku and Seibu Ikebukuro lines, for which it provides diagram management and 13 other functions. Diagram management, train coordination, announcement control, traffic route control and operation-data transmission functions provide fine control capabilities tuned to match the specific characteristics of the two lines. The article gives an overview of SEMTRAC, covering its configuration and functions.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 65, No. 11, pp. 78~84 (1991)

A Super High-Rise Escalator with a Horizontal Mid-Section

by Ryoichi Saito, Yasumasa Haruta, Akio Iwata & Tatsuya Yoshikawa

The corporation has delivered an escalator that has a section of horizontal travel at the middle of its 42m rise. The horizontal section offers new architectural layout possibilities and its presence seems to have a reassuring effect on the riders. The commercial escalator incorporates the results of studies on various technical issues affecting high-rise escalator design. These include the startup system, load distribution among multiple drive units, synchronization of the stairs and handrails, and the problems affecting the horizontal mid-section elevator design, step pulsation and handrails coming off their tracks at the horizontal mid-section.

Mitsubishi Denki Giho: Vol. 65, No. 11, pp. 85~90 (1991)

A 90mm Rewritable Optical Disk Drive

by Kazuhiko Nakane, Masaharu Ogawa, Manabu Ogura, Kyosuke Yoshimoto, Yoshihiro Kiyose & Teruo Furukawa

The corporation has developed a compact, lightweight, high-capacity $90 \mathrm{mm}$ rewritable optical disk drive for auxiliary storage applications in personal computers and other compact information-processing equipment. The drive, including its built-in controller, is accommodated within the 3.5-inch half-height form factor of conventional magnetic-disk drives. The new drive employs ISO standard optical disk media with a capacity of $127\mathrm{MB}$ per disk. The disk spins at 3,000rpm, allowing rapid read and write operations with an average access time of $42\mathrm{ms}$. The drive supports data-transfer rates of up to $5.3\mathrm{MB/s}$ to the host computer via a SCSI-2 compatible interface.

巻 頭 言

シンクロトロン放射光装置特集に寄せて ―― 光は東方より ――

東京大学 教授 物性研究所軌道放射物性研究施設長 日本放射光学会 会長

理学博士 石井 武比古



3年ほど前、日本では放射光フィーバーが起こっていると言われたことがある。当時の世界の常識を超える数の放射光計画が提案されていたからである。今年、ヨーロッパ放射光学会が「世界の放射光施設の概要」という小冊子を出版した。そこには、世界の放射光施設が、計画中のものや、単なる提案に過ぎないものまで含めて、網羅的に紹介されている。我が国については、22基の光源リングが記載されていて、数の上では他国を圧倒している。そこに取り上げられていない二、三の企業プロジェクトを含めると、我が国の光源数はもっと多い筈である。

一体、この状況をどう理解したらよいのか。何を生み出すかわからない新しいものの持つ魅力に引き付けられるのと、バスに乗り遅れまいとする心理がこれを加速する、というのが一つの見方である。確かに、LSI 技術へのインパクトは大きい。早晩、半導体工業への応用の道が拓けるであろう。我が国におけるこの方面の研究水準は高いが、半導体のチップのような工業製品の製造に組織的に利用できるまでには、若干の時間が必要である。

図面通りに設備を作っても、期待通りの性能が得られないのが常識であり、長い試行錯誤の結果、使用に耐える製品が出現する。放射光技術では、その中心に据えられる設備が加速器であり、その周囲にビームラインと光学機器がくるので、必要な技術開発は見かけ以上に多岐にわたる。単に光源から光が出てくれば済むものではない。すべてが終わったとき、そこに蓄積される新技術は質・量共に極め

て大きい。

基礎科学研究の方から眺めたとき、放射光が明らかにした新しい現象の解析が如何に目覚ましいものであったかは、今日、発展途上国を含めた多くの国で放射光科学が科学技術推進政策の重要な柱になっていることを見れば明瞭である。原子・分子の分光学や固体物理学から出発した研究は、基礎的な物理学・化学は勿論のこと、広く生命科学や地球科学にも及んでいる。また、半導体工学、金属工学などの応用科学の分野での放射光利用も進展の一途を辿っている。このように、基礎研究分野での発展は留まるところを知らないように見える。この分野の研究推進が国策として行われている所以であろう。

我が国のユニークさは、放射光を利用した基礎研究および技術開発が、民間企業のプロジェクトとしても、かなり広汎に行われつつある、ということである。基礎研究および技術開発における放射光の将来性を見越してこの分野に参入した三菱電機の先見性に、私は心から敬意を表する。これまで、加速器開発をはじめ、諸々の大型プロジェクトを手懸けて、関連技術を蓄積してこられた当然の帰結であると思う。企業は利潤を求めるのであろうが、開発期間の中で元気を失うことがないよう声援を送りたい。

「光は東方より」という言葉がある。人類の文化がオリエントに始まったことを指す言葉であるが、私は、究極の放射光利用技術がさらにはるか東方の国より出現するものと信じて止まない。

特別 寄稿

放射光源技術の現状と動向

㈱自由電子レーザ研究所 理事所長 理学博士

冨増 多喜夫



1. はじめに

(株ソルテックは、(財基盤技術研究促進センターおよび三菱電機をはじめとする民間企業13社の出資により、シンクロトロン放射光(以下"SR"(Synchrotron Radiation)という。)利用技術の研究開発を目的として昭和61年6月に設立された。筆者は設立当初から(株ソルテックの放射光施設計画部会長として、(株ソルテックをはじめ関係企業の方々とともに、1 GeV 放射光装置、建屋ならびに付帯設備を含む放射光施設の基本設計、仕様書の作成、建設にたずさわった。この度、執筆する機会を与えられたのもこの御縁によるものと、当時を思い出し感慨を新たにしている。

(株)ソルテックは 10 年間で超 LSI への SR 利用技術を開発 するということで、試作する放射光装置としては、運転開始 後1年で1GeV で蓄積電流200 mA の定常運転が必要であっ た。当時,国内には5台のSR光源があったが,いずれも定 常的に200mAを蓄積するのに最低2~3年必要とする状態 であったため、1GeV 放射光装置としては、電子入射器とし て、前段に40 MeV 電子リニアックを、後段に1 GeV 電子 シンクロトロンを用いるフル エネルギー入射方式を採用し, SR による真空枯らしが早期に達成できる構成とした。この ため、放射光装置としては小型よりも中型に近い規模のもの となったが、蓄積リングの大電流・長寿命化では、チャレン ジングな真空槽の内面処理により真空圧 1×10^{-11} Torr 台 の達成、電子リニアックによるエネルギーの揃った低エミッ タンス ビームの加速、電子シンクロトロンによる大電流加 速など、すべてが順調にしかも予想以上の成果が得られ、運 転開始後1か月で蓄積電流200 mA の定常運転が可能となっ た。その結果、運転開始1年半後で常識をくつがえす200 mA で寿命50時間という画期的な成果を達成し、産業用SR 光源の新しいイメージを作りだした。

本稿では、このようなブレークスルーが可能となった理論 的背景も含めて技術開発の成果の概略と放射光装置技術の動 向について述べたい。

2. 放射光源開発の現状と SR 利用の展望

現在までに稼働した放射光源の数は、世界で45台(18台) (カッコ内は国内の台数),建設中のものが17台(2台),計 画中のものが分かっているもので14台(7台)ある。稼働し た放射光源の4割が日本にあり、特にこの5年間では、世界 で倍増, 国内では約4倍になったことになる。建設中, 計画 中のものも含めると、1 GeV 以下の小型が34台(16台), 1 GeV~3GeV の中型が28台(8台), 3GeV 以上の大型が14 台(3台)となる。1GeV以下の34台のうち、リソグラフィ 専用は12台だが、日本にはすでにリソグラフィ専用のもの が7台, 自由電子レーザ (Free Electron Laser, FEL) 専用 (NIJI-IV) のものや円偏光放射専用(NIJI-II) の挿入光源専 用の小型リングが2台あり、日本のフィーバーぶりは世界の 注目を集めている⁽¹⁾。日本の中型光源は PF (Photon Factorv) が稼働して以来ここ10年の間で6台計画され、まだ 建設に至っていないが、世界の中型リングは計画中のものも 含めて28台あり、軟X線~X線領域をカバーするSR光源 への期待の大きさを示している。これらの放射光源からの SR 利用で、今後産業に関連する応用分野として以下のもの が考えられる。

- ① 微細加工(SR リソグラフィ,マイクロマシン, SR エッチング)
- ② 物質の構造解析や評価(EXAFS, XANES, 真空紫外光 電子分光)
- ③ 半導体結晶の欠陥や歪みなどの評価(トポグラフィ)
- ④ 元素分析(蛍光 X 線分析)
- ⑤ 光化学反応 (SR-CVD, 紫外域単色光による有機合成)
- ⑥ 心臓の毛細血管撮影(アンジオグラフィ)
- ⑦ 遠赤外分光

図1は、これらのSRの応用分野で必要とするおおよその 光子エネルギーと光子数を示す。応用分野によっては、必要 とする SR のビームサイズとエネルギー分解能 ($\triangle E/E$) に幅があるが、リソグラフィやアンジオグラフィなどの大面積照射を必要とする応用では安定で多量の光子を必要とするので SORTEC のような大電流・長寿命の放射光源が不可欠になる。利用分野が多い光子エネルギー域は $10\,\mathrm{eV}\sim100\,\mathrm{keV}$ の広範囲にわたっているので、一台のリングで全エネルギー域にわたって高強度の SR を発生することは困難であり、1 GeV 以下の小型リングで $10\,\mathrm{eV}\sim1\,\mathrm{keV}$ 、 $1\sim3\,\mathrm{GeV}$ の中型リングで $100\,\mathrm{eV}\sim1\,\mathrm{keV}$ 、 $3\,\mathrm{GeV}$ 以上の大型リングで $1\sim10\,\mathrm{keV}$ をカバーするのが得策である。ここでは放射光光源の展望を述べるに先立って、産業に関連する SR 利用のうち代表的なものとして SR リソグラフィ、光化学反応と CVD 研究の現状と課題を述べる。

(1) SR リソグラフィ

SR のリソグラフィ研究への利用は、1976 年西独 DESY リ ングで試みられて以来(2), 仏、日、米でもサブミクロン線 幅の微細加工を高アスペクト比でしかも高速で可能なことが 実証された $^{(3)}$ 。最近のSRリソグラフィでは、Heガス中で の露光で0.1 µm 線幅の加工, ±0.01 µm 精度での位置合わ せが可能となっている(4)。しかし、最近のデバイス製造技 術の推移からも明らかなように水銀ランプを用いる在来の縮 小投影露光によるリソグラフィ技術の進歩は著しく、すでに 0.5 μm 線幅の 16 M DRAM がこの方法で製作され、0.3 μm 線幅の64 M DRAM も位相シフトリソグラフィを用いる縮 小投影露光によって可能な見通しである⁽⁵⁾。SR リソグラ フィの出番は、エキシマレーザを用いる位相シフトリソグラ フィでは実用解像度が不足する 256 M DRAM か1G DRAM からで1995年頃からと予想されている。いまのところ、SR リソグラフィに利用される軟 X 線の波長は1 nm 前後である が、マスク製造が容易な4.5 nm 前後の SR の利用も検討さ れている⁽⁶⁾。しかし、従来の光露光の長所である縮小投影 法が利用できないこと, SR ビームが水平で, 垂直方向に狭 いビームであることから、縦型アライナーやミラー駆動や電

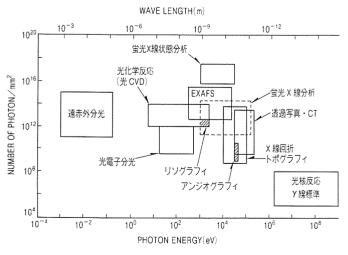


図1. SR の応用分野で必要とするおよその 光子エネルギーと光子数

子波動による照射野の拡大が必要なこと, リソグラフィ技術 とともにマスク技術の開発も必要なこと, SR 光源の小型化, 低コスト化も含めて幅広い技術蓄積に数年を必要とする。

(2) 光化学反応と CVD

強力な紫外光を気体分子に照射すると分子振動の変化や外 殻電子の励起が生ずるので、従来より低い温度で光CVDや 有機合成が可能になる。現在の光CVDでは、反応ガスを励 起分解するため、水銀灯や在来のレーザ光源によりモノシランなどを分解し、アモルファスシリコン (a-Si:H) 膜などを作っているが⁽⁷⁾、素子の微細化に伴い光CVDなどの半 導体プロセスには、低損傷化、低汚染、無駄な拡散を少なくするための低温化などの厳しい条件が要求されている⁽⁸⁾。

SR は紫外域ばかりでなく、真空紫外~軟 X 線域をカバーする連続スペクトルをもつため、反応ガス分子の内殻電子の励起またはイオン化が起こり、イオン等の反応活性種に分解する。最近これらの光生成イオンの種類が飛行時間 (TOF)型質量分析装置で測定されるようになり、反応ガス解離の光子エネルギー依存性が調べられ⁽⁹⁾、SR が複数反応ガスの励起分解に適していることが分かってきた。図2は電総研リングTERAS からの SR を分光して測定されたモノシランなどの光吸収断面積である⁽¹⁰⁾。これらから明らかなように、反応ガスの種類によって紫外吸収端と最大吸収波長が異なるため、在来のエキシマレーザの波長間やさらに短波長域をカバーできる波長可変の単色光が必要となる。

これらの期待に応えられる光源として、図3に示すように 高エネルギー電子が蛇行運動や螺旋運動をするときに発生す るアンジュレータ放射光やFELがある。これらは超高真空 中で発生する波長可変な(準)単色光であり、光源の高強 度・長寿命化によっては汚染の恐れのない光源としてCVD や有機化学反応の選択的励起にも使用できる。

3. 放射光装置技術の現状と動向

放射光源施設は、電子入射器、電子蓄積リング、挿入光源

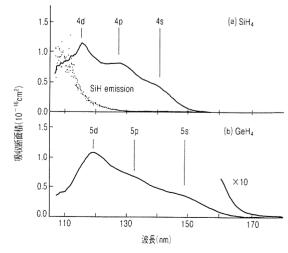


図2. SiH₄, GeH₄の光吸収断面積(図中の点は 生成物からの発光を示す。)

装置, SR ビームライン, 放射線遮蔽材など で構成されるが、本稿での放射光装置は、電 子入射器と電子蓄積リングを指すと考えてい る。(株)ソルテックの1GeV 放射光装置 (11) は、電子入射器として、前段に40 MeV 電子 リニアックを、後段に1GeV 電子シンクロ トロンを用いるフル エネルギー入射方式を 採用しており、放射光装置としては小型より も中型リングに近い規模をもつものであるが、 蓄積リングの大電流・長寿命化では、画期的 な試みがなされた。ここでは、電子リニアッ クの加速ビーム電流と電子ビームのエネル ギー幅やエミッタンスとの関係。電子シンク ロトロンの加速電流とエネルギー利得の関係、 蓄積リングの真空槽の残留ガス圧や電磁石配 列とベータトロン振動数の選択、など放射光 源の性能を決定する放射光装置技術の現状と 動向を㈱ソルテックの1GeV 放射光装置の 開発と関係づけながら述べる。

3.1 電子リニアックによるエネルギーの揃った低エミッタンス ビームの加速

電子リニアックを用いて電子シンクロトロ ンや蓄積リングに効率よく電子を入射するに は、バンチ当りの加速電流は数Aでもよいが、 電子ビームのエネルギー幅を数分の一%程度, エミッタンスを $10^{-6}\pi$ m・rad 程度にする 必要がある。SORTEC の40 MeV 電子リニ アック⁽¹²⁾では、加速ビームのエミッタンス とエネルギー幅を小さくするために電子銃カ ソード径を1cm 以下とし、ダブル プリバン チャーと定在波型で π/2 モードの4 MeV バンチャーを採用し、加速管には2.3m 長の 進行波型で電総研仕様の2π/3モードの定 テーマ口径型 (C型とD型)(13)を2本、マ イクロ波源に PV-3030 A クライストロンを 用いている。SORTEC-LINACは、バンチ 当りの加速電流は5Aであるが、エネルギー 幅は±0.67%で、0.7πmm・mrad の低エミ ッタンス ビームの加速に成功し⁽¹²⁾,電子

シンクロトロンでの大電流加速に貢献している。図4は、FEL 発生用の電子リニアックや蓄積リングの電子ビームのエネルギー幅とエミッタンスを SORTEC-LINAC のデータとともに示したものである。このような電子リニアックによるエネルギーの揃った低エミッタンス ビームの大電流加速技術は可視一紫外域のFEL 発生用として今後ますます重要になるだろう (14)。

3.2 電子シンクロトロンによる大電流加速

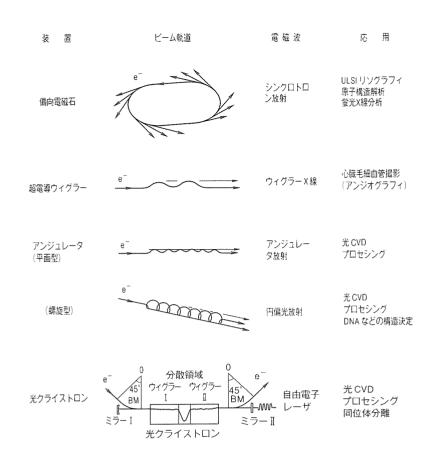


図3. 高エネルギー電子によって発生する種々の放射光

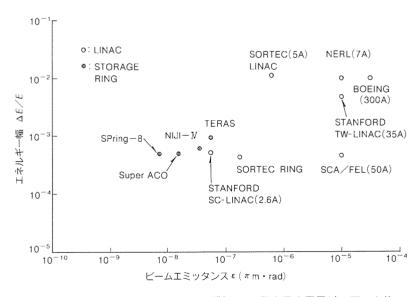


図4. SORTEC のリニアックやリングと FEL 発生用の電子リニアックや 蓄積リングの電子ビームのエネルギー幅とエミッタンス

電子シンクロトロンの加速電流の上限は、入射ビームの質、入射電子の軌道修正の良否、入射エネルギー、リング状真空槽の真空度、RF 捕獲効率、加速時のビーム損失の程度に依存する。したがって、(株)ソルテックの1GeV電子シンクロトロンでは、電子リニアックによってエネルギーの揃った低エミッタンス ビームを入射し、セプタム電磁石前後に設置された4台のバンプ電磁石によって入射電子の軌道を修正して、入射時におけるビーム損失を少なくしている。また、電

子シンクロトロンの電磁石は硅素鋼板の積層構造で、パルス励磁であるため、低磁場では磁場バンプが生じやすいので電子の入射エネルギーを $40\,\mathrm{MeV}$ とし、入射エネルギーの $25\,\mathrm{eff}$ (ここではエネルギー利得と呼ぶ)の $1\,\mathrm{GeV}$ まで加速する途中でのビーム損失をできるだけ少なくするように設計されている (15)。図 $5\,\mathrm{ct}$ は、主な電子シンクロトロンや蓄積リングの加速または蓄積電流とエネルギー利得の関係を示した。SORTEC-SYNCHROTRON は目標値である $30\,\mathrm{mA}$ を簡単に達成し、最高 $100\,\mathrm{mA}$ の加速にも成功している (16)。 $1\,\mathrm{GeV}$ 級電子シンクロトロンでの最大加速電流は、 $1980\,\mathrm{fe}$ に東大核研が達成した $160\,\mathrm{mA}$ であるが (17)、 $200\,\mathrm{mA}$ 以上の大電流加速は今後の研究課題である。

3.3 放射光源の蓄積電流の大電流・長寿命化

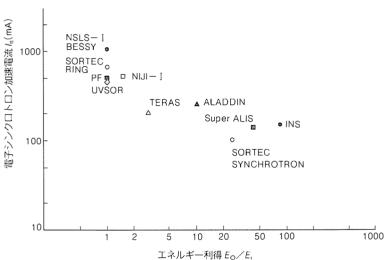


図 5 . 主な電子シンクロトロンと蓄積リングの加速または蓄積電流とエネルギー利得

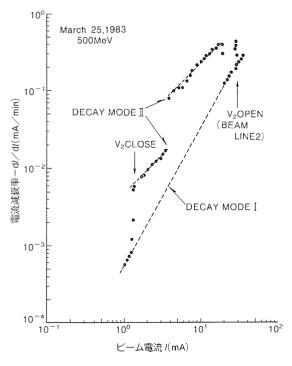


図6. 電流減衰率と減衰モードの関係

(1) 蓄積電流の減衰理論と減衰モード (18)

蓄積リングの真空槽内面の枯れが十分でない頃や,利用者が SR 用ビームラインを使い始めた頃は,蓄積電流の減衰の様は千変万化であり,従来の時間t 一電流 I の関係を表わす (t, I) 表示では,その減衰の原因を知る手がかりが得られない。しかし,図 6 のように TERAS の蓄積電流と電流の減衰率の関係を (I, dI/dt) 表示で表すと,その減衰の変化に対応して,真空槽内壁からのガス放出によるほぼ電流の二乗に比例して減衰するモード (減衰モードII) か,停滞ガスの局在による電流に比例して減衰するモード (減衰モードII) かを示せる。

図7は、電流減衰率表示と蓄積電流 I と真空槽内のガス圧力 P (全周長にわたってほぼ一様の場合) との関係から、SR による真空槽内壁からのガス放出や残留ガスによる電流の減衰率成分が求められ、ガス放出などを評価できることを示したものである。すなわち、筆者が導いた電流減衰理論では、軌道を周回している電子バンチの体積 V が I に比例するとすると、蓄積電

流の減衰率は次式で表され、

$$-dI/dt = aI^{2-n} + bI^2 + cI \cdot \dots \cdot (1)$$

第一項のタウシエク効果による減衰率成分,第二項の放出ガスによるもの,第三項の残留ガスによるものの和で表されるので,電流減衰の原因を容易に推定できるようになった。ここで重要なことは,TERASのタウシエク寿命は200 mAで50時間近くあることから,真空槽の内面処理により式(1)の b

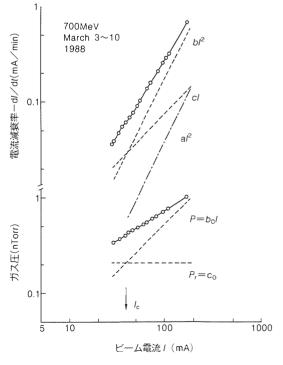


図7. 電流減衰率とガス放出,残留ガス,タウシエク効果による減衰率成分(bl^2 と cl の成分は真空圧成分 b_0l_0 と C_0 から決定される。)

と c の絶対値を小さくすれば、 $200 \, \text{mA}$ の寿命を $40 \, \text{時間以上}$ に向上できることを理論的に予言して $^{(19)}(20)$ 、SORTEC リングで実証されたことである $^{(21)}$ 。

(2) 真空槽の内面処理とラティスの選択

図8は、TERAS と SORTEC の蓄積電流の減衰率を示したものである。

TERAS は、1981 年10月に稼働してから、寿命はどんどん 伸びたが、1987年頃から FEL 実験用の真空槽の改造、ラン ダウ空胴の増設で、ガス放出が多く寿命は伸び悩んでいる。 SORTEC は1989年9月に稼働し始めてわずか1か月で200 mA を定常的に蓄積するという記録を達成し、1年半後には ビーム断面を丸くして (式(1)の α の値を小さくして) 200 mA で寿命は50時間に達している⁽²¹⁾。この TERAS と SOR TEC の電流減衰率の差は、真空槽内面処理法の差によると ころが大きい。図9は、真空槽内面の粗さと零電流時の残留 ガス圧の関係を示す。TERAS の真空槽は、1980年に作られ たもので、内面は GB 処理である。SORTEC の真空槽は、 1988年に作られたもので、内面は電解研磨処理で、内面の 粗さは1μm 程度である(22)。内面の粗さでほぼ2桁,残留 ガス圧でほぼ1桁の差があり、この1桁の差は、式(1)のbc cがそれぞれ1桁小さい値であることを意味し、図8の電 流減衰率の1桁の差を説明することができる。

図9の理化学研究所のデータは、蓄積リングの真空槽ではなくテストチエンバーのデータであるが、残留ガス圧はSORTECのデータより0.5桁低い $^{(23)}$ 。このことから、真空槽内面処理によって、残留ガス圧を 5×10^{-12} Torr にできれば、1 GeV 以上の電子ビームで特に低エミッタンスにしなければ、すなわちラティスの選択によってタウシエク効果(式

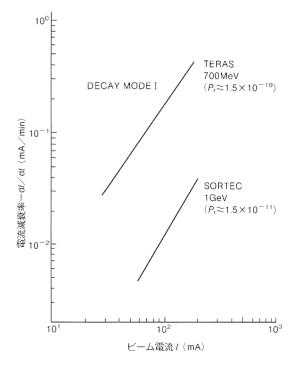


図8. TERAS と SORTEC の電流減衰率

(1)のa の値)を小さくできるので電流寿命は、 $200 \, \text{mA}$ で $100 \, \text{時間以上、} 1 \, \text{A}$ で $4 \, \text{時間以上に伸びる可能性がある。} この大電流化はアンジオグラフィ用ウィグラー <math>X$ 線の高強度化にも有効である。

3.4 挿入装置による SR の高輝度化・高エネルギー化

国内外で開発されている小型リングの多くは、いずれも数年後の線幅 $0.2\,\mu\mathrm{m}$ 以下のLSI リソグラフィ用光源として開発中のものである。一方、高強度のウィグラーX線を用いて心臓毛細血管撮影 (angiography) $^{(24)}$ を行うシステムも最近注目されている。心臓の冠状動脈系の $1\,\mathrm{mm}$ 径以下の毛細血管を鮮明に撮影するにはX線として指向性が良くて血管造影剤 (ヨウ素) によく吸収される $33\,\mathrm{keV}$ 前後のX線が必要になる。このような心臓の冠状動脈系診断システムを開発していくには、病院規模の小型X線リングに1A 級の電流を蓄積し、高強度の $33\,\mathrm{keV}$ の単色X線を発生できるような10 テスラ級の超電導ウィグラー $^{(25)}$ の挿入、大面積照射 $^{(26)}$ 、放射線検出感度の向上が必要である。

アンジオグラフィとともに注目され始めた FEL は、SR が連続スペクトルを持つのに対して、単色で波長可変という 優れた特性を持ち、蓄積リングや電子リニアックを用いて発生できる紫外域の FEL は選択的に化学反応を制御できる。 図10に6.3 m 長の光クライストロンを挿入できる FEL 用の 小型リングの配列例を示す。

このように SR の高輝度化のために、長い挿入光源を設置できて、低エミッタンス ビームを蓄積できる高輝度光源が各地で建設されるようになった。図11は、既存または建設中のリングの長直線部が周長に占める割合と周長との関係を示したものである。NIJI-IV、SPring-8、APS、ESRF、ALS、POHANG、SRRC などは6m以上の長直線部を持つDBA かTBA の電磁石配列で、第三世代の放射光源と呼ばれるものである。

3.5 放射光源施設の小型化

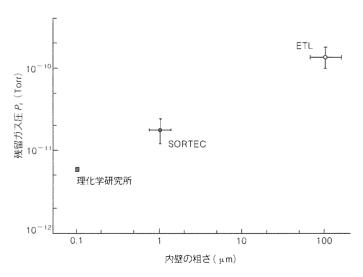


図9. 真空槽内面の粗さと残留ガス圧との関係

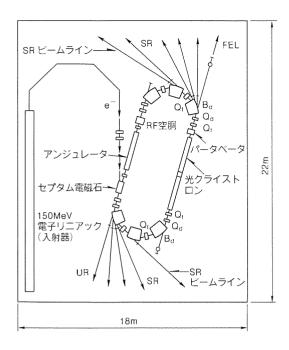


図10、FEL 用小型SR施設の配列例

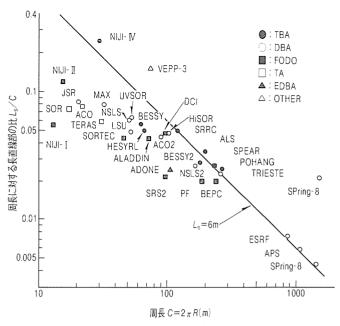
SRX線やFELを工場や病院などで使えるようにするには

- (1) リングの小型化(曲率半径は小さく,直線部に挿入光源が入れられる。)
- (2) 短い照射用ビームライン(数m)で大面積照射できる。
- (3) 入射器の小型化 (低エネルギー1A入射)
- (4) コンパクトなシールド (低エネルギー入射 高効率蓄 積)
- (5) 真空槽の内面処理とラティス選択による大電流蓄積・長寿命化(1Aで1/e寿命 4時間以上)

をバランス良く達成し、価格の低廉化を図らなければならない。

放射光施設の小型化では、(1)のリングの小型化と(2)のビームラインを短くすることのバランスが大切で、偏向電磁石の超電導化は必ずしも施設の小型化・低廉化とは結びつかない。フルエネルギー入射でないリングの超電導化は、超電導コイルの定電流運転が可能でないので、ヘリウムの消費量も大きく運転経費も大きくなる。

三菱電機(株)で建設中の超電導リングは電子シンクロトロンによるフルエネルギー入射なので、入射電子をそのまま貯蔵するだけなので超電導コイルの定電流運転が可能であり、ヘリウムの消費は少なく経済的であるが、大規模な入射器が必要になる。(3)の入射器の小型化は、設備費低廉化と施設の小型化のうえで不可欠であり、(5)の真空槽の内面処理による大電流蓄積・長寿命化は、ベーキング無しのリング運転や、運転1か月後から200mAの定常蓄積が可能になれば、従来のリングが200mAを定常的に蓄積するのに2年以上を必要とすることを考えると運転経費の低廉化に極めて重要である。



TBA はトリプルベンド アクロマット型, DBA はダブルベンド アクロマット型, TA はトリプレット アクロマット型, EDBA はイクステンデット ダブルベンドアクロマット型

図11. 蓄積リングの長直線部 L_s が周長 C に占める割合と 周長との関係

4. おわりに

現在国内外で開発中の小型リングの多くは SR リソグラフ ィ用を目指したものである。最近、光の位相を変化させるシ フター材にふっ素系ポリマーを用いた位相シフトマスクを三 菱電機(株)と旭硝子(株)が開発し、水銀ランプの i 線 (波長 365 nm) で0.35 µm 線幅のパターン形成を行い、64 M ビット DRAM に適用できる可能性が出てきている(5)。超 LSI 産 業の成長とともに光リソグラフィの進歩があまりにも急速で、 今のところ 256 M ビット DRAM の量産もエキシマレーザを 用いる位相シフトリソグラフィで検討されているが、SR リ ソグラフィの出番は256M~1Gビット DRAM 用として 1995年以後と予想されている。一方, 競合技術の進歩が期 待できないアンジオグラフィ用小型リング、光化学研究用の 短波長 FEL 用小型リングの開発は特に重要である。今後開 発すべき小型 SR 光源としては、リソグラフィ用軟 X 線リン グ,医学診断用 X 線リング, FEL 用リングのほか, 1台で リソグラフィや CVD, FEL 研究, などに使用できる多目的 研究用小型リングがある。大型、中型のリングはすべて挿入 光源用として建設されているが、小型リングも目的に応じて 光クライストロンや偏光アンジュレータ⁽²⁷⁾ などを1台か2 台挿入して独自の研究が可能な多目的小型リングが多くなる だろう。

最後に、(株)ソルテックの1 GeV 放射光施設建設のプロジェクトに真剣に取り組まれた関係各位に敬意を表し、筆をおきます。

参考文献

- (1) 冨増多喜夫: Semiconductor World, 9, No. 10, p.183
 (1990), シンクロトロン放射技術, 工業調査会, p.24
 (1990)
- (2) E. Spiller, et al.: J. Appl. Phys., 47, 5450 (1976)
- (3) H. Aritome, et al. : J. Vac. Sci. Technol., 15, 992 (1978)
- (4) J. Itoh, et al.: 1987 SPIE Santa Clara Symposium on Micrography 773, p.7 (1987-3)
- (5) 小宮啓義, 古本次郎:日刊工業新聞(1991-6)
- (6) K. Suzuki: Proc. Topical Symposia on Synchrotron Radiation, JSSRR (Tsukuba), p.15 (1991-1)
- (7) Y. Toyoshima, et al. : Appl. Phys. Lett., 51, 1925 (1987)
- (8) 吉田 明:光・薄膜技術マニュアル,オプトロニクス社 p.440 (1989)
- (9) 上田 潔, 佐藤幸紀:放射光 I, No. 2, 1 (1988)
- (10) U. Itoh, et al.: J. Chem. Phys, 85(9), 4867 (1986)
- (11) S.Nakamura, et al.: Proc. EPAC 90 (Nice), Vol. 1, p.472 (1990-6)
- (12) M. Shiota, et al.: Proc. 7th Symp. on Acc. Sci. and Tech., RCNP (Osaka), p.10 (1989-12)
- (13) T. Tomimasu: IEEE Trans., NS-28(3), 3523 (1981)

- (14) 冨増多喜夫 他:応用物理, 60(7), (1991) 出版予定。
- (15) M. Kodaira, et al.: Proc. EPAC 90 (Nice), Vol. I, p.409 (1990-6)
- (16) 小平政宣:私信 (1991)
- (17) 吉田勝英:原子核研究, 25(3), 1 (1980)
- (18) 冨増多喜夫:真空, 29, No. 7, 299 (1986)
- (19) T. Tomimasu, et al. : Jpn. J. Appl. Phys., 25, 1706 (1986)
- (20) T. Tomimasu, et al. : Rev. Sci. Instrum., 60, 1744 (1989)
- (21) 淡路直樹 他:理研SR 真空シンポジューム (1991-3)
- (22) M. Ohno, et al.: Proc. EPAC '90 (Nice), p.1335 (1990-6)
- (23) S. Kato, et al. : J. Vac. Sci. Technol. A 8(3), 2860 (1990-5/-6)
- (24) 秋貞雅祥,武田 徹: 冠状動脈の差分造影診断法,シンクロトロン放射技術,富増多喜夫編著,工業調査会,p.511 (1990)
- (25) S. Sugiyama, et al.: TELL-TERAS Activity Report 1987 ~ 1990, Electrotechnical Lab., p.117 (1990-12)
- (26) T. Tomimasu: SPIE 1140 X-Ray Instrumentation (Paris), p.207 (1989-4)
- (27) H. Onuki, et al.: Appl. Phys. Lett., 52, 173 (1988)

三菱電機と放射光装置

森川鐵也* 岩本雅民** 河村博敏***

1. まえがき

放射光 (Synchrotron Radiation:シンクロトロン放射) は、 光の速度に近い電子又は陽電子が、進行方向を磁界などによって変えられる時に放出される連続スペクトルを持った、指 向性の強い光 (電磁波) である。

この放射光は、赤外から X 線に及ぶ広い波長領域をカバーし、主として物性研究における分析手段として広く利用されてきた。とりわけ短波長領域の放射光は、今後の先端分野での利用が注目されており、その発生装置への期待が大きい(1)。例えば、研究の観点からは、物性・材料分析・生命科学などの科学分野の最先端研究のための大規模な放射光施設の実現が、また産業利用の観点からは、半導体リソグラフィ用のコンパクトな放射光装置の出現が期待されている(2)。

前者に関しては、科学技術庁(日本原子力研究所、理化学研究所)が兵庫県播磨科学公園都市に大型放射光施設 SPring -8 を建設中である⁽³⁾。後者に関しては、リソグラフィの専用光源装置が(株ソルテックに設置され、放射光の産業利用技術の研究が進められている⁽⁴⁾。

当社はこれまで国・公立研究所の加速器施設に向けて多くの主要コンポーネントを納入してきた。近年、これらのコンポーネント技術をベースに放射光装置システムへと取組を拡大しつつある。すなわち、システム設計、コンポーネントの最適設計と製造、据付け・組立て、ビーム制御・調整を一貫して行う形へと取組の強化・拡大を図ることで、放射光ユーザーの要請に十分こたえうるバランスの良い装置の実現に努めている。なお、これらの取組の強化と並行して、加速器のシステム設計に必要な基本設計技術(ビーム シミュレーション技術、電磁界解析技術等)の開発と実用データ蓄積にも注力するとともに、より高度な光源と期待されている自由電子レーザに関する基本技術の開発も、鋭意実施している。

2. 放射光装置(SR装置) 構成の概要

SR 装置は大別してリングへの入射器, ビーム輸送系, 蓄積リング, 全系制御系から構成される(図1)。

(1) 入射器

入射器に要求される機能としては、エネルギー的にも空間 的にも分散の少ない電子(又は陽電子)を高エネルギーに加 速することである。蓄積リングへの入射ビームのエネルギー は、

- 蓄積エネルギーと同じ
- ・蓄積エネルギー以下(数分の一程度が代表的) のいずれかである。

前者は高エネルギー電子ライナックのみで加速する形式 (図1(1)) と低エネルギーの電子ライナック (又はマイクロトロン) とブースタ シンクロトロンを組み合わせて構成する 形式 (図1(2)) とがある。

後者に関しては、一般的に中エネルギー電子ライナック (又はマイクロトロン) のみで構成 (図1(3)) される。この場合、蓄積リングで蓄積エネルギーまで更に加速しなければならない (以下、ビームの加速と蓄積を行うことから、このようなリングを"加速/蓄積リング"という。)。

(2) ビーム輸送系

電子ビームを電子ライナック(又はマイクロトロン)とリング間,シンクロトロンとリング間を真空ダクトを通じて輸送する系で,ビームの損失や空間的な発散がないように電磁石が配置される。

(3) 蓄積リング

入射器から出射されたビームを,放射光を発生させるため 定軌道上を安定に周回させ,長時間保持する高真空のリング である。

また、蓄積リングの直線部にはアンジュレータやウィグラ

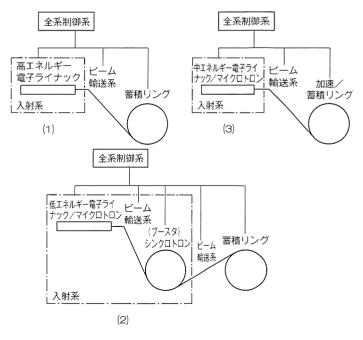


図1. SR 装置の構成

ーと呼ばれる挿入光源を設置し、利用目的により放射光の輝度を高めたり、放射光の波長をシフトする場合もある。

(4) 全系制御系

上記(1)~(3)の装置及び電力供給機器や冷却水機器等の周辺設備を含め, SR 光源装置全体を運転・管理する制御系である。

3. SR 装置の技術開発と実績

3.1 入射器(電子ライナック)

昭和42年に東北大学理学部原子核理学研究施設に300 MeV のライナックを納入して以来,ライナックの納入実績(平成3年3月)は次のとおりである。

- 医療用電子ライナック (2.8 ~ 20 MeV) 265台
- ・工業用電子ライナック (0.95~ 12 MeV) 109台
- ・研究用電子ライナック (40~300 MeV) 9台

SR 装置用の電子ライナックは、リングへのビーム入射効率を上げるため、ビーム広がりに関する指標である空間エミッタンスが小さく、エネルギー分散の小さいことが要求される。このような高性能化の要請を受けて、以下のような様々な技術開発を実施してきた。

- (1) ビームの空間的,位相的な軌道解析(空間電荷効果を含む電界)結果をもとに、定在波型加速管の採用等,新しい考え方を入れたビーム加速系の改善。
- (2) 電子銃と加速管の間に2台の集群空洞(プリバンチャ)をタンデムに配し、ビームの集群効果の強化による加速効率の向上。
- (3) ビームエネルギーの差異を磁場によってビームの行路差とし、ビームエネルギーに依存して加速管の加速位相を調整するビームエネルギー スペクトルの改善(エネルギー圧縮装置:ECS)。

このような電子ライナックの高性能化により、リングへの 入射電流を大きくでき、かつ安定して加速できるようになっ た。表1にSR光源装置用電子ライナックの納入実績を示す。

3.2 リングの構成機器と SR 装置システム

SR 装置のリングを構成する主要な機器は、

・各種の電磁石群(偏向、四極、六極、ステアリングの

各電磁石) とこれらの電源

- ・ビームを長時間保持するための超高真空のビームダク ト及び真空排気装置
- ・ビームを加速する高周波加速空洞とその電源
- ・ビームの位置, エネルギー, 電流, 形状等を検出する ビームチニタ
- ・ビームをリングへ入射させるインフレクタ,ビームを リング外に取り出すデフレクタ,ビームの定常軌道に 摂動を与えるパータベータ,キッカ等の入出射機器 が代表的なものである。

従来,当社では大学や研究機関等へリングを構成するコンポーネント(電磁石,電源,制御システム,真空関連機器等)の数多い納入実績を持っており,近年では昭和60年から SR 装置の開発に着手し, SR 装置のシステム解析,設計に必要なソフトウェアの開発とハードウェア開発及び構成機器の据付け技術開発を実施してきた。ハードウェアに関しては,納入機器の製作に先立って,以下に示す社内での技術開発(以下"R&D"という。)を実施し,それらの試験評価を行って技術の確立とその検証を行ってきた。

SR 装置システムにかかわる技術開発内容とその成果について納入実績例をもとに以下に示す。

(1) 超高真空技術(㈱ソルテック納め1GeV 放射光装置例) 蓄積リングに要求される 10^{-8} Pa 台の超高真空の技術を確立するため真空ダクトを試作し、製作プロセスとともに真空特性を評価し、 10^{-11} Torr 台の超高真空を達成した。この技術の適用によって(㈱ソルテックの蓄積リングは無負荷時 1×10^{-11} Torr、ビーム $200\,\mathrm{mA}$ 蓄積時には 8×10^{-10} Torr の超高真空を得ており、ビームの寿命が $50\,\mathrm{h}$ 以上の安定した運転が行われている(7)。

(2) 高周波加速空洞技術(同上)

実機相当のR&D機(共振周波数118 MHz. クラッド材,リエントラント型)を試作し、高周波特性を評価するとともに製造技術、計測技術をそれぞれ確立した。また、解析コード(SUPERFISH)の計算結果との比較、円筒型ループチューナーの特性試験、排気ポート部による高周波特性の影響を確認した。

表1. SR 装置用電子ライナックの実績

納入先(納入年)項目	電子技術総合研究所 ビームライン(昭55)	分子科学研究所 ⁽⁵⁾ (昭58)	日本電信電話(㈱ ⁶⁾ (昭61)	三菱電機㈱ 中央研究所 (昭62)	(株)ソルテック (平 2)
エネルギー(MeV)	300(無負荷時520)	15	15 (13)	20	40
ビーム電流 (mA)	240	25	270 (250)	100	100
ビームエミッタンス (πmm·mrad)	1.0	(2.5)	2.1(1.0)	1.5	0.7
エネルギー分散(%)	±1.0	(±0.5)	<1.0	< ±0.6	±0.67

注 ():設計値

(3) 入出射機器技術(当社中央研究所用 SR 装置例)

インフレクタ,デフレクタ,パータベータ,キッカの試作研究により,高磁界化による機器のコンパクト化と高速パルス磁界発生技術の開発とその性能の実証を行った。

(4) 各種ビームモニタ技術(同上)

電流モニタ(高速CT, 直流電流測定用CT, ファラデーカップ式電流モニタ), ビーム形状モニタ, ビーム位置モニタ (ボタン型ビーム位置モニタ, 蛍光板モニタ), ビームエミッタンス測定装置等の試作研究により, 高精度のビーム測定技術の開発とその性能確認を行った。

(5) 電磁石の製造技術(大型放射光施設向けR&D)

大型放射光施設 (SPring-8) 向けR&Dとして以下の電磁石を製作し、高い製作要求精度を達成できた。

- (a) 日本原子力研究所計画のシンクロトロンのR&D用 四極電磁石, 六極電磁石
- (b) 理化学研究所計画の蓄積リングの R&D 用六極電磁石
- (6) システム解析, 設計技術及び電磁界解析技術 (株) ソルテック納め 1 GeV 放射光装置例)

SR装置のシステム設計や解析に関する以下のソフトウェアを持ち、過去に納入した装置や試作品の実測結果との照合によってプログラムの開発/改良・利用技術の向上を図っている。

- (a) ラティス設計
- (b) 粒子トラッキング, ダイナミック アパーチャ解析
- (c) ビーム不安定解析, ウェークフィールド解析
- (d) 高周波空洞にかかわる高周波解析及び電界解析
- (e) 電磁石にかかわる三次元静磁界解析及び渦電流解析
- (7) 据付け・アライメント技術

偏向電磁石,四極電磁石の設置に関しては100 μm 以下の 高い設置精度が要求される。これら電磁石のアライメントに 関して、高精度セオドライトを組み合わせた三次元測定システムを用い。

- (a) (株) ソルテック納めの SR 装置
- (b) 日本原子力研究所納めのJSR 装置
- (c) 当社中央研究所のシンクロトロン

で上記要求の設置精度を達成した。

リングシステムの主な納入実績を表2に示す。

4. 自由電子レーザにかかわる技術開発

3.2節のSR 装置にかかわる基幹技術(1)~(7)のほかに, より高度な光源の実現を目指した自由電子レーザの基本技術 を確立するため、以下の技術開発を実施している。

- (1) シミュレーション コードの開発
 - (a) ウィグラー中の電子と電磁場との相互作用
 - (b) 磁場の不均一性 (アライメントのずれ等に起因) の影響解析
- (2) 自由電子レーザ発振と計測・制御を確立するための基礎 実験

5. SR 光源装置の小型化への取組

超超LSIのリソグラフィ用光源として,また材料分析用の 光源として,小型のSR装置の出現が産業界,研究機関から 期待されている。当社はこれらの要請に対し幅広くこたえる べく,各種小型SR光源装置の設計検討を行っている。小型 SR装置のシステム構成としては以下の案が考えられる。現 在,各方式の特長と放射光の利用形態及びユーザーの要請等 を考慮して,最適方式を選択できるよう設計検討を進めてい るが,実績ある安定したビーム電流値保証の観点から,当面 は常電導(電磁石)方式が期待され,やがて液体へリウム消 費量が少なく,メンテナンス性に優れた超電導(電磁石)方

表2. リング関連の機器又はシステムの納入実績

納 入 先(納入年)	機器又はシステム名 (加速/蓄積エネルギー)	備考
分子科学研究所(昭57)	UVSOR ライナック:12MeV 加速,蓄積リング:600MeV	・ライナック,電磁石,電源を製作 ・左記の他アンジュレータの製作(昭61)
日本原子力研究所(平1)	JSR (加速/蓄積リング) 既設ライナック:150MeV JSR:300MeV	・幹事会社を担当・偏向/ステアリング電磁石,電源及びリング入射機器を納入
(株)ソルテック(平 2)	1GeV 放射光装置 ライナック:40MeV 加速,蓄積リング:1GeV	・幹事会社を担当・蓄積リング、ライナック、全体制御系、 低エネルギービーム輸送系を製作
三菱電機(株) 中央研究所 (ライナック:昭62, シンクロトロン:平3)	シンクロトロン放射光装置 ライナック:20MeV シンクロトロン:1GeV	蓄積リングは製造中
理化学研究所(平2)	蓄積リングR&D用六極電磁石	大型放射光施設の R & D 用
日本原子力研究所(平2)	シンクロトロンR&D用六極電 磁石,四極電磁石	大型放射光施設のR&D用

式に置き換わるものと考えられる。

5.1 常電導方式の小型 SR 装置

常電導方式は大別して下記2種類に分けられる。

- "中エネルギーライナック+加速/蓄積リング" (1リング方式)
- ・"低エネルギーライナック+(ブースタ)シンクロトロン+蓄積リング"(2リング方式)

中エネルギーライナックを入射器とする1リング方式は、ビームの加速/蓄積を1リングで行うため、設置スペースと経済性の点で有利である。しかし、蓄積電流を得るには毎回ライナックからビーム入射し、加速後蓄積運転せねばならず、蓄積ビーム電流の継ぎ足しができない運転方式であるため、この間(~10 min)放射光を利用できないというビーム利用効率面での難点がある。

一方、2リング方式はリングを二つ持つため、設置スペースと経済性に制約を受けるが、時間的に減少する蓄積電流に対してシンクロトロンから蓄積リングにビームを随時入射でき、ほぼ一定で安定した蓄積電流が得られる特長がある。

5.2 超電導方式の小型 SR 装置

プラント設置スペース及びランニングコストの面でメリットの大きい超電導加速/蓄積リングを用いた小型 SR 装置への期待は大きい。しかし、これには安定したビーム電流と液体へリウム消費の低減、ヘリウム冷凍系を含むメンテナンス性等の諸技術課題の解決を経た運転実績の積み上げが必要である。

6. む す び

当社では、SR 装置のコンポーネント技術の高度化、SR 装置システム技術、及びそれらを支えるビーム シミュレーションや電磁界解析技術について開発と実証を行ってきた。これらはいずれも今後の次世代高輝度光源やコンパクトな産業用光源の実現に大きな貢献を果たせるものと期待される。

今後の課題としては,

(1) SR装置の小型化とともに高い信頼性を実現するための

各コンポーネントの性能,精度向上,運転データ蓄積な どの技術高度化

- (2) ビームの自動調整・自動運転といったビーム運転・監視 技術等のノウハウ蓄積
- (3) ユーザー要請を踏まえ利用形態に合った SR ビームラインの開発とその標準化

といった点が挙げられよう。今後これらの具体化についても、 鋭意努力していく所存である。

参考文献

- (1) 石井武比古:物性研究所短期研究会報告-軟X線真空紫外領域の新しい光物性の展望とSOR将来計画,東大物性研究所、 $1\sim2$ (1984)
- (2) 冨増多喜夫:小型シンクロトロン放射光源の開発とその 応用,電子技術総合研究所彙報,53, No.1 (1989)
- (3) 上坪宏道:科学技術庁大型放射光施設計画—SPring 8-,日本放射光学会第三回年会予稿集,日本放射光学会,63~64 (1990)
- (4) 中村史朗, 岡田浩一:ソルテック1 GeV 放射光施設, 放射光, **3**, No. 2 (1990)
- (5) 分子科学研究所:入射用シンクロトロンの設計(UVSO R-7),分子科学研究所,32~34 (1981)
- (6) 細川照夫,北山豊樹,早坂東亜,柴山昭則:結晶加工と 評価技術第145委員会B分科会(放射光利用)―第18回 研究会資料,日本学術振興会,4~9 (1989)
- (7) 小平政宣, 淡路直樹, 宇佐見 浩, 岸本 健, 渡辺牧夫 :ソルテックにおけるSR光源運転実績, 第38回応用 物理学関係連合講演会講演予稿集, 1286 (1990)
- (8) Nakamura. S., Kitano, R., Shiota, M., Tomimasu, T.: 40 MeV Linac for the 1 GeV Synchrotron Radiation Light Source. Proceedings of The 13th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sept. 7 - 9, 1988, ETL, Umezone Tsukuba

(株)ソルテック1 GeV 放射光装置

淺井脩次* 原口正文+ 水田典幸+++ 中村史朗** 高橋成夫* 阿刀田伸史+ 高仲政雄*** 小峰 淳++ 冨増多喜夫++

1. まえがき

シンクロトロン放射光 (SR) の利用技術の確立を目的とし て、基盤技術研究促進センターと民間企業13社の共同出資 による研究開発機関(株)ソルテックが昭和61年6月に設立さ れた。三菱電機(株)と(株) 東芝は、その放射光装置(以下 "SR 装置"という。)の建設・試験を担当し、平成元年3月末に 搬入, 据付け, 7月末からビームを用いた調整試験を開始. 2か月後の9月28日には初のビーム蓄積と放射光の発生に 成功した。さらに、その1か月後には蓄積電流200 mA、ビ ーム寿命4時間以上というこの装置の目標性能値を達成し、 記録的な短期間で仕様を上回るビーム性能を得て平成2年1 月に(株)ソルテックへの引渡しを完了した。その後、ビーム 寿命は更に向上して200 mAで50時間に達し、現在まで順 調に運転されている。ここに、装置の構成及び性能などにつ いて概要を報告する。なお、この装置の構成機器のうち、電 子ライナック, 電子蓄積リングは三菱電機(株)が, 電子シン クロトロンは(株) 東芝がそれぞれ製作した。また、制御シス テムは三菱電機(株)(一部(株)東芝)が製作した。

この SR 装置は放射光の産業利用を目的とした研究用光源であることから、安定で強度の高い放射光をできるだけ確実

に、かつ早く得ることが要請された。この ため、このリングシステム設計では、加速 と蓄積との機能を分離したフルエネルギー 入射方式で常電導磁石方式を採用した。

2. 装置の構成

この SR 装置のレイアウト (地下 1 階) は、図1に示すように40 MeV 電子ライナック (全長約 9.5 m) 及び電子のエネルギーを40 MeV から1 GeV まで加速する電子シンクロトロン (直径約 14 m) の 2 台の入射器及び1 GeV の電子をシンクロトロンから入射し蓄積する蓄積リング (直径約 15 m) から構成されている。

放射光は蓄積リング偏向部に設置された SR ポートからビームラインを介して取り 出され、コンクリート壁 $(1 \, m)$ の周辺に 配置された SR 利用室に供給される。

また、SR装置の運転・監視は地上1階

の制御室に設置された全体制御システムから集中的に行われる。

2.1 システム設計

この装置は、放射光の産業利用、ことに X 線リソグラフィ技術の研究用光源として下記の点を考慮した設計がなされた。

2.1.1 要求される放射光の特性

半導体製造の際のスループット(単位時間当たりの製造量)を確保するためには、露光条件に適した波長帯で高いパワー密度の放射光が、安定して得られることが必要である。この SR 装置に要求された光源点における放射光特性は以下のとおりである。

- (1) ピーク波長 : 0.5~1 nm
- (2) 放射光パワー密度: 40 mW/Å/mrad²以上(1 nm中心), 240 mW/mrad²以上(0.7~1.3 nm)
- (3) ビーム寿命 : 4 h 以上

光源点で発生した放射光は、光源点からウェーハまでのビームラインに設置された機器の条件(X線ミラーの構成、反射率、真空隔離窓(通常 Be の薄膜)、X線マスクの透過率等)によって減衰し、かつ波長選別される。上記の放射光特

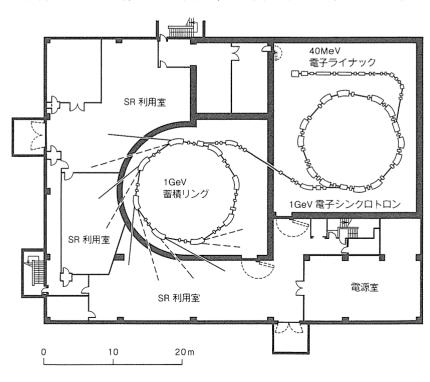


図1. SR 装置の概観(実験棟地下1階平面図)

性の条件のうち(1)ピーク波長と(2)パワー密度は主として, これらビームラインの機器の条件,レジスト感度及びウェー ハとマスクの位置制御を行うアライナーのアライメント速度 から決定されたものである。

一方,(3)電子ビームの寿命は長い方が望ましいが,ビーム寿命は蓄積された電子が周回するビームダクトの真空度に大きく依存しており,他の施設の実績から運転初期の段階で4時間以上の寿命を達成することは高度な目標と考えられた。

2.1.2 システムの選択

このSR 装置のシステム設計に当たっては、安定で高強度 の放射光を確実早期に得ることを第一目的としたフルエネル ギー入射、常電導磁石方式を採用した。

(1) 入射方式

SR 装置の入射方式には、この装置のように入射器の段階で最終エネルギーまで加速した後、蓄積リングに入射、蓄積を行うフルエネルギー入射方式と、200 MeV 程度以下の入射器から蓄積リングに直接入射、蓄積した後、加速を行う加速蓄積方式がある。

フルエネルギー入射方式は、蓄積リングにおける入射蓄積 時のエネルギーが高いためビームが安定しているので、加速 蓄積方式より大電流を蓄積できる可能性が高い。また、入射 エネルギーが最終エネルギーであるため、蓄積電流がビーム 寿命で低下してきた際の追加入射を行うことができる。一方、加速蓄積方式は、入射器を比較的小型にすることができるの でコスト、据付けスペースの面で有利である。

(2) 偏向電磁石の方式

蓄積リングの偏向電磁石には常電導方式と超電導方式が考えられる。常電導方式は加速器として実績が多く、安定した 運転が期待できるが、超電導方式に比べて磁場が低いため偏向半径を大きくする必要があり蓄積リングが大きくなる。

2.1.3 光源装置の主要パラメータ

以上の設計方針を踏まえて選択した光源装置の主要パラメータを表1に示す。また、蓄積リングから得られる放射光のスペクトル分布を図2に示す。

以下,三菱電機(株)担当の電子ライナック,蓄積リング, 全体制御システムについて各装置の概要を述べる。

2.2 電子ライナック⁽¹⁾

表1. 光源装置の主要パラメータ

入射器	電子ライナック	40MeV
	電子シンクロトロン	1 GeV
	入射加速繰り返し	最大1.25Hz
蓄積リング	エネルギー	1 GeV
	偏向半径	2.78m
	偏向磁場	1.2T
	蓄積電流	200 m A
	ピーク波長	0.65nm
	臨界波長	1.55nm

SR 装置の入射器に用いられる電子ライナックはビーム電流強度が大きいことに加えて、医療用・工業用の電子ライナックに比べて良質のビームを供給することが要求される。具体的には出力ビームのエミッタンス ε (位相空間における広がり)とエネルギー幅 $\Delta P/P$ をシンクロトロンの入射条件に適合させるために十分小さくする必要がある。このため、この装置では電子銃出口部スリット、プリバンチャー2台、バンチャーを設けることによってエミッタンス及びエネルギー幅を改善している。

電子ビームの加速に用いられる2,856 MHz のマイクロ波源はピーク出力35 MW のクライストロンを用い、出力をプリバンチャー2台、バンチャー、主加速管2台に供給している。表2に電子ライナックのビーム特性の測定値を示す。

2.3 蓄積リング⁽²⁾

リングは偏向部に偏向電磁石 (BM) 8台, 8か所の直線部にはビームの収束に用いられる四極電磁石 (QF, QD) 16台, 色収差補正用の六極電磁石 (SF, SD) 8台, 軌道補正用のステアリング電磁石 8台が設置されている。さらに, 直線部には入射のためのインフレクタとバンプ電磁石, ビームにエネルギーを供給する高周波加速空洞, 計測用モニタが各々設置されている。また, リング全体にわたって真空ポンプを配置している。図3にリングの構成を,表3にリングの主なパラメータを示す。

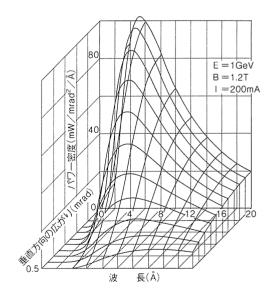


図2. 放射光のスペクトル分布

表 2. 電子ライナックのビーム特性(測定値)

エネルギー	$40 \mathrm{MeV}$
出力電流	60~80mA
(エネルギー幅, エミッタ	ンス条件を満たすもの。)
パルス幅	$1.7 \mu s$
エネルギー幅(半値幅)	$\pm0.67\%$
エミッタンス	0.7π mm·mrad

以下にラティス設計・入射系・電磁石・真空システム・ RF システム・モニタの概要を述べる。

(1) ラティス設計

ビームの軌道解析を行い、リングのラティス構造(電磁石の配列)を、ビーム調整が比較的容易であり、光源点に当たる偏向部でのビーム径が小さく、寿命が長いなどの観点から 8個の FODO セル構造 (QF、直線、QD、直線) に決定した。 図 4 にラティス構造の特徴を示す関数としてベータトロン関数 β 、分散関数 η を示す。リング内のビームサイズはこれらの関数を用いて次式のように示される。

ビームサイズ
$$\sigma = \sqrt{(\eta \Delta P/P)^2 + \beta \varepsilon}$$

(2) 入射系

入射方法は繰り返し電子を入射し、蓄積する多重回転入射

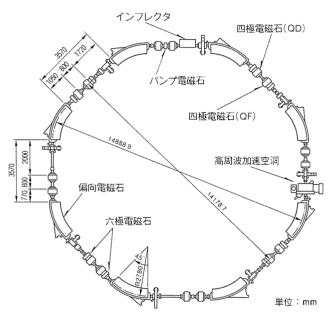


図3. 蓄積リングの構成

表3. 蓄積リングの主パラメータ

ビームエネルギー	1 GeV
周 長	45.73m
平均半径	7.28m
偏向磁場	1.2T
配列	FODO
$\mathcal{F}_{\mathcal{I}}$ $\mathcal{I}_{\mathcal{X}}$	2.235
$\nu_{\rm Y}$	2.215
RF 周波数	118MHz
RF 電圧	90kV
モーメンタム	
コンパクション ファクタ	0.165
放射損失	31.84keV/turn
エミッタンスε	0.5mm·mrad
ビームサイズ σ_X	2.0mm
$\sigma_{\rm Y}$	0.7mm
タウシェク寿命(200mA 蓄積時)	40h

法を採用した。したがって入射系は、既に蓄えられたビームの軌道を入射ビームの軌道近くまで変形するためのバンプ電磁石3台とインフレクタとしてのセプタム電磁石から構成されている。

セプタム部出口(リング入射点)でのベータトロン関数は ビームサイズを小さくし、入射効率を高くするよう決定され ている。セプタム電磁石位置での入射、蓄積されたビームの 水平方向位相空間上での動きを図5に示す。図において大き なだ円はアクセプタンス(真空ダクトで制限されるビームの 存在可能範囲)を示す。この図に示すように入射後4ターン 目には入射ビームはセプタムに近づくが、この4ターンの間 にバンプ軌道がシフトしており、セプタムに当たらないこと が分かる。また、入射ビームのうち、エネルギー分散が± 0.2%以内のビームはアクセプタンス内にあることが分かる。

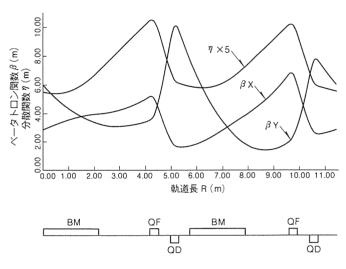
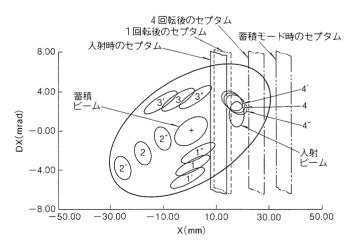


図4. ベータトロン関数と分散関数



1, 2, 3, 4 ······入射 1, 2, 3, 4 回転後のビームの水平方向空間位相 (エネルギー分散が無い場合)

1, 2, 3, 4 ······入射1, 2, 3, 4 回転後のビームの水平方向空間位相 (エネルギーが0.2%低い場合)

1", 2", 3", 4" ······入射 1, 2, 3, 4回転後のビームの水平方向空間位相 (エネルギーが0.2%高い場合)

図5.入射ビーム、蓄積ビームの挙動(インフレクタ出口)

真空ダクトを含むセプタムの厚さは6mm, ビームサイズは6mmとし, バンプ軌道は4mm/turnの速度でシフトするよう設計されている。

(3) 電磁石

電磁石は、磁場計算による詳細な解析を行ってポール幅、シム形状を決めた。表4に主な特性を示す。

偏向電磁石鉄心は、放射光ポートと真空排気用ポートが真空ダクトに設置しやすいよう C型を採用した。磁極部の製造、組立ては $\pm 25~\mu m$ の精度で行われている。

(4) 真空システム(3)

ビーム寿命を長くするために、真空ダクト内の真空度を超高真空に保つことが重要である。このため、ビーム電流 200 mA における真空度を 1×10^{-9} Torr 以下となるように真空システムを設計した。短期間でこの目標に到達するために光脱離 (発生した放射光が蓄積リングの真空ダクトに照射されることにより、真空ダクト壁の気体分子がたた (叩) き出される。) によるアウトガスを効率的に排気することができるよう設計した。

直線部は上流部に400 L/s スパッタイオンポンプと1,000 L/s チタンゲッタポンプ,中央に300 L/s チタンゲッタポンプを,偏向部は1,000 L/s チタンゲッタポンプと分散型イオンポンプを設置している。リングの全排気速度は約26,000 L/s となる。

真空ダクトは、SUS 316 L、304 L で製作し、電解研磨後、250 \mathbb{C} 、48 時間のベーキングの前処理を行い、さらに組立後 ソルテックサイトで $150 \mathbb{C}$ 、48 時間のベーキングを行って いる。その結果、ビーム無しで平均 1×10^{-11} Torr 以下の 真空度を得ることができた。

(5) RF システム

高周波加速空洞の加速電圧はビーム寿命 4 時間以上という要求から $90\,\mathrm{kV}$ に設定した。空洞はリエントラント型とし、本体は銅と SUS のクラッド鋼、中心電極は無酸素銅で作られている。空洞の特性パラメータは、Q 値が低パワー試験から 20,100、シャント抵抗 R_s はシンクロトロン周波数から $1.35\,\mathrm{M}\,\Omega$ と測定された。電源は、ビーム $200\,\mathrm{m}\,\mathrm{A}$ でシンクロトロン放射損失を補うため $14\,\mathrm{k}\,\mathrm{W}$ 容量を準備した。

(6) モニタ

モニタは蛍光板モニタ,静電型位置モニタ,電流モニタ, SR モニタが設置されている。

蛍光板モニタは4か所の直線部に設置され、ビームがリングに入射される初期調整時の計測に用いられる。蛍光板の材質は、99.5%Al₂O₃である。

静電型位置モニタは各直線部に設置されている。ビームにより誘起される電界を 4 個のボタン型電極で検出し、ビーム位置に換算する。モニタはビーム電流 0.1 m A の感度を持ち、軌道中心で $\pm 0.5 \text{ mm}$ の精度を持つ。

電流モニタは、DC 電流トランスでビームによって誘起さ

れる磁場を検出し、ビーム電流 10 μA の感度を持つ。

ビーム診断のためのSRポートは全偏向部に設置し、ビーム形状をTVモニタ上に表示する。

2.4 制御システム(4)

2.4.1 ハードウェア

上位計算機システム《MELCOM 70 MX/3000 II》は、マンマシンインタフェース (CRT、キーボード、タッチパネル)が接続された、メモリ (16 M バイト)、ディスク (500 G バイト)、CPU から成る。ここではシーケンス処理・監視・モニタ処理・遅いフィードバックが行われる。下位計算機システムは、インテル80286,8086を基礎としており、SR 装置構成機器の機種及び機器の配置領域対応に機器付近に配備され、約200 台ある機器との直接的な入出力 (関数発生を含む。)を分担している。ここでの入出力ソフトウェアは ROM 化されている。上位計算機・下位計算機間インタフェースとしては、光ケーブルによる RS-232 C 及び GP-IB を使用している。

同期信号のクロック源は、加速のための118 MHz の RF 源と同一のシンセサイザである。下位計算機システムである同期信号発生器は、そのクロックを基に上位からの設定に従って周期信号やトリガ信号を、同期を必要とする機器へ光ケーブル経由で供給している。

誤操作・不注意等からの人への放射線照射事故防止のためのSR装置全体にわたるインタロック、いわゆるグローバルインタロックはハードウェアで構成されている。同時に、インタロックの入力信号を入力している上位計算機では、そのロジックをソフトウェア対応で組み立てている。フェールセイフのための二重化が施されている。

2.4.2 ソフトウェア

ここに記述するソフトウェアとは、上位計算機のものである。OSとしては、UNIX (注1) と三菱電機(料製リアルタイム用の"OS 60 UMX"が搭載されている。SR 装置の運転に必要不可欠な基本的な応用ソフトウェアは、三菱電機(株)で制作された。加速器の運転経験に伴い、ユーザーがユーザー指向の強いソフトウェアを開発することが可能となっている。これら応用ソフトウェアは UNIX 下の管理となる。下位計算機を含めた外部周辺機器への入出力は、《OS 60 UMX》の

(注1) UNIX オペレーティングシステムは、UNIX システムラボ ラトリーズ社が開発し、ライセンスしている。

表4. 電磁石の特性

磁場 磁極長	偏向電磁石 1.2T	四極電磁石	六極電磁石
77	1.2T		
磁场巨		10T∕m	$60T/m^2$
1722/1925 122	2,183mm	290mm	150mm
有効磁場幅	84 m m	66mm	66mm
間げき長/ボア径	53mm	47mm	53mm
均一度	5×10^{-4}	2×10^{-3}	
	$(\Delta B \angle B)$	$(\Delta G \angle G)$	

管理下となる。主な基本応用ソフトウェアについて以下に記述する。

運転モードハンドラーは、SR 装置を三分割した各ブロック (ライナック、シンクロトロン、蓄積リング) に対して運転起動・運転停止のシーケンス処理を、ユーザーの入力に従って実行する。ユーザーは制御卓 CRT と会話しながら入力する。SR 装置構成機器の高再現性・高安定性に伴って、ユーザーにとって容易な定常運転が可能となっている。

機器ハンドラーは、ユーザーによる加速器構成機器単位のすべての操作(ビームモニタ表示操作を含む。)やサブブロック内機器の設定値操作を制御卓上で可能としている。これは、ビーム調整・機器調整等に使用される。

スーパバイザは、加速器構成機器等が何らかの異常を来た した場合、ユーザーにそれを警告する。場合によってはビー ム運転を止めるためのシーケンスをも起動する。

3. ビーム初期調整⁽⁵⁾⁽⁶⁾

この装置は製造メーカー (三菱電機(株)及び(株)東芝) 主体でビーム調整を行い、蓄積リングへのビームの蓄積試験を行う初めての例であった。ビーム調整の経過を表5に示す。

電子シンクロトロンのビーム調整を平成元年8月初めから 開始し、約1か月半後に1GeVへの加速に成功した。さら に、シンクロトロンと蓄積リングとを結ぶビーム輸送系のビ ーム調整等を行った後、9月27日に蓄積リングにビームを 導入した。蓄積リングにおける1回転、多回転調整で偏向電 磁石、四極電磁石、入射機器等のパラメータを決定し、翌 28日には放射光の発生を確認した。

その後、真空度の改善に伴って徐々に蓄積電流を増加させ、10月23日には200mA 蓄積に成功、同月末にはこの装置の設計目標であった200mA においてビーム寿命4時間を達成した。図6に更に1か月後の11月末の蓄積電流と寿命の関係を真空度と併せて示す。ビーム寿命はこの時点で8時間となった。

また、図7には9月末から12月初めまでの寿命特性の変化を示す。蓄積リングの真空度と寿命特性との間には密接な関係があり、寿命特性の伸びは光脱離によってダクト真空度が改善されたことによる。

上記に述べたような予想以上に短期間のビーム調整、急速

表 5. ビーム調整の経過

平成元年	8月初め	シンクロトロンビーム調整開始
	9月16日	シンクロトロン1GeV 加速確認
	9月27日	蓄積リングにビームを入射
	9月28日	蓄積リングにビーム蓄積成功
	10月23日	200mA ビーム蓄積に成功
	10月末	200mA で寿命 4 時間
		(設計目標値達成)
平成3年	6月現在	200mA で寿命50時間以上

なビーム寿命の伸びは、他のSR 装置に見られる例を上回る ものである。このような結果を得られた理由として次の点が 挙げられる。

(1) 真空系のシステム,機器設計が適切であり,真空ダクトを始めとする真空機器の製造,組立時の清浄管理が徹底していたため、蓄積リングで目標以上の超高真空が極めて早期に

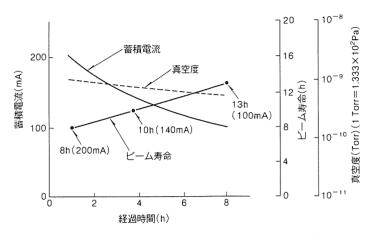


図6. 蓄積電流とビーム寿命の関係(平成元年11月末)

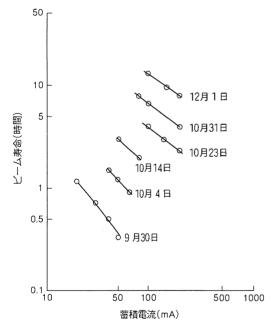


図7. 初期調整時のビーム寿命の伸び

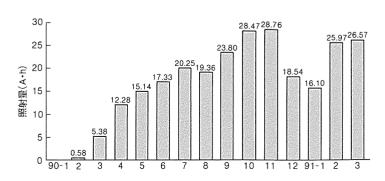


図8.1990年1月~1991年3月の月別蓄積リング照射量

達成できた。

- (2) 蓄積リングを構成する電磁石の磁場精度,電源出力安定 度等について設計値を十分満足する精度が得られ,かつ電磁 石のアライメント(±0.1 mm 以内)が良好であった。
- (3) SR 装置のシステムの選択 (2.1.2項), ラティス構成, 制御方式等全体システムの設計が適切であった。

このSR 装置は平成 2 年 1 月,(株) ソルテックに引渡しを終えたのち,SR 利用側ビームラインの接続を行い,同年 4 月から SR 利用研究が開始されている。

4. 運転実績(7)(8)

図8は、(株)ソルテックに引き渡し後約1年間の運転時間を電流時間積にてまとめたものである。この間、SR装置側のトラブルでの運転休止はほとんどなく、産業用目的に適した安定した光源であるといえる。

(株ソルテックでは、SR 利用運転とともに、各種パラメータと寿命の関係等、蓄積リングについてのマシンスタディも実施されており、パラメータの最適化が図られている。その結果、先に述べた真空度の向上と相まって、現在、定格(200 mA 蓄積) 時のビーム寿命は50時間以上を達成している。

5. む す び

以上の結果, SR 装置として非常に短期間での光源の立ち上げを実現し, 安定したビーム性能で長い寿命など世界的に最高レベルの性能が達成できた。

これは、信頼性の高い常電導磁石を用いてフルエネルギー 入射方式を採用した、所期の設計方針、システムの構築及び 真空ダクトなどコンポーネントに対する製作・施工方法が適 切であったことが実証された結果である。

(㈱ソルテックでは現在,この装置からの放射光を用いて, 次世代の半導体のためのリソグラフィの研究開発が順調に行われている。さらに,今後の研究のためにビームの大電流化 (500 mA) が計画されており,設計検討,マシンスタディを 進めている。

参考文献

- (1) Shiota, M., Hiraki, A., Mizota, M., Iida, T., Haraguchi, M., Kuno, K., Nakamura, S., Ohno, M. Tomimasu, T.: Design and Performance of the 40 MeV Linac and Beam Transport System for the 1 GeV Synchrotron Radiation Source at SORTEC, Proc. of the 7th Symposium on Accelerator Science and Technology, 10~12 (1989)
- (2) Yamamoto, Y., Takanaka, M., Asai, O., Iida, T., Kijima, Y., Nakamura. S., Ohno, M., Awaji, N. Tomimasu, T.: Performance of the 1 GeV Electron Storage Ring for the Synchrotron Radiation Source at SORTEC, Proc. of the 2nd European Particle Accelerator Conference, 475~477 (1990)
- (3) Ohno, M., Awaji, N., Nakamura, S., Tsuchidate, H., Kuno K., Kojiro, T., Iida, T., Tomimasu, T.: Performance of the Vacuum System for the 1 GeV Electron Storage Ring, ibid., 1335~1337 (1990)
- (4) Takanaka, M., Iida, T., Komine, A., Awaji, N., Nakamura, S., Ohno, M., Toyoda, E.: Control System of the 1 GeV Synchrotron Radiation Source at SORTEC, ibid., 836~838 (1990)
- (5) 中村史朗, 岡田浩一:ソルテック1GeV放射光源施設,日本放射光学会誌, **3**, No. 2, 127~141
- (6) Nakamura, S., Ohno, M., Chiba, A., Kitano. R., Nishizawa, H., Asai, O., Takanaka, M., Iida, T., Yamamoto, Y., Shiota, M., Mizota. M., Kawazu, S., Kodaira, M., Kondo, K., Tomimasu, T.: Present Status of the 1 GeV Synchrotron Radiation Source at SORTEC, Proc. of the 2nd European Particle Accelerator Conference, 472~474 (1990)
- (7) 淡路直樹, 小平政宣, 宇佐見 浩, 岸本 健:ソルテック電子蓄積リングのイオントラッピング現象, SR 真空シンポジウムプロシーディングス, 45~52 (1991)
- (8) 岸本 健,小平政宣,淡路直樹,岡田浩一,伊藤 徹,柳田健三:ソルテックにおける SOR 光源施設の現状,平成3年電気学会電子・情報・システム部門全国大会予稿集 (1991)

大型放射光施設 SPring-8 の計画と開発

横溝英明* 和田 雄*** 熊原忠士** 津田元裕+ 能公教表*** 神代哲士++

1. まえがき $^{(1)}\sim(3)$

1980年代の電子ビーム偏向部を主な光源とする2~3 GeV 級の専用電子蓄積リングを第二世代の放射光施設とすると, 次世代型の施設では, より高輝度で, より強く, より短い波長の光を発生するものが要求されてきた。放射光発生技術上からは, 電子ビーム偏向部から発生する放射光に加え, 電子ビームの軌道上に設置し, 短波長側に波長をシフトさせ光の強度を上げるウィグラーや, 光の輝度を格段に高くするアンジュレータのような挿入型光源装置 (挿入装置) が開発されてきた。特にアンジュレータ光は,

- (1) 光の輝度が高い。
- (2) 光の平行度が良く干渉性が高い。
- (3) 準単色光で波長は可変である。
- (4) 偏光特性を直線偏光から円偏光まで設計できる。 など従来型の放射光に比べ、はるかに優れた特長を持つ。

これらの特長を持つ高輝度放射光の利用は、物質・材料系 科学、ライフサイエンス、情報・電子系科学技術、原子力な ど広範囲な分野の最先端研究に及び、未踏の研究課題に挑戦 しようという次の世代の展望が開けてきた。

このような背景下で、科学技術庁は1985年航空・電子等技術審議会に諮問し、1987年の答申をもとに日本原子力研究所(JAERI)と理化学研究所(以下"原研"、"理研"という。)を主体とする"大型放射光施設研究開発共同チーム"を発足させ、この施設の建設準備と開発研究を開始した。続いて1989年に同庁は、正式に大型放射光施設SPring-8(Super Photon ring-8)を兵庫県播磨科学公園都市内に設置することを決定した。

SPring-8の建設は1990年度に 着手し、本格的共同利用開始は 1998年度に予定されている。

本稿では,原研でSPring-8を建設する上で必要となるビーム制御技術,挿入装置の研究・開発等を目的として設置された小型放射光装置

JAERI Storage Ring (JSR) 及びSPring-8の計画概要を記すとともに、原研・理研の研究開発に協力して実施した三菱電機(㈱の開発の一部について報告する。

2. JSR の概要

JSR (4)~(6) は,放射光を得るための小型電子蓄積リングである。この装置は原研東海研究所にあった既設のライナックを入射装置として使用し,新たにビーム輸送系及びJSRを増設する形で建設された。1988年1月に設計を開始し,同年12月据付け開始,翌1989年3月に据付け・調整を完了した。図1にJSR の全景を示す。図2にJSR の平面図を示す。ラティス(電磁石の配列)はチャスマングリーン型である。周長は20.546mであり,対称性は3である。3本の長直線部には,それぞれ電子ビームを入射するためのパルス電磁石,高周波加速空洞,挿入装置を設置する。表1にJSRの主要パラメータを示す。

JSR を構成する主なものは、電子ビームを曲げるための偏光電磁石 $6 \div (1 \div 1)$ の偏向角は 60°、偏向半径は 835 mm)、電子ビームを収束させるための四極電磁石 $15 \div 1$ 、電子ビームを入射するときに使用するキッカー電磁石 $1 \div 1$ 、イ

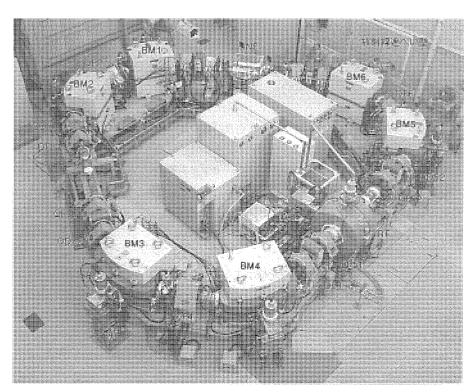
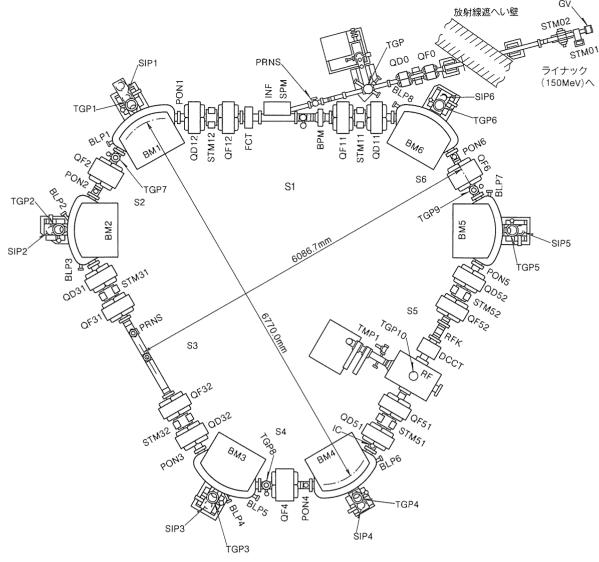


図1. JSR 全景



BM:偏向電磁石

QD:四極電磁石(収束) QF:四極電磁石(発散) STM: ステアリング電磁石

BPM:キッカー電磁石 SPM:セプタム電磁石

INF: インフレクタ

RF: 高周波加速空洞 PRNS: プロファイルモニタ

PON:ボタン型静電位置モニタ

DCCT: DC Current Transformer FCT: Fast Current Transformer

S:直線部

IC:イオンクリアリング電極 TGP:チタンゲッターポンプ

SIP:スパッタイオンポンプ TMP:ターボ分子ポンプ

BLP: 光ビームラインポート

GV:ゲートバルブ RFK:RF ノックアウト電極

図2. JSR の平面図

ンフレクター(セプタム電磁石を含む。)1台及び電子ビーム を加速するための高周波加速空洞1台である。キッカー電磁 石のパルス幅は630 ns で磁場は0.4 Tである。セプタム電磁 石のパルス幅は250 μs で磁場は0.89 T である。セプタム電 磁石で電子ビームを15.172°(偏向半径560mm)偏向させて JSR に入射する。高周波加速空洞の周波数は116.7 MHz で, ハーモニック数は8である。

ビームモニタは電子ビームの位置を検出するためのボタン 型静電位置モニタ6台, ビーム電流を測定する DCCT 1台, Fast-CT 1台, ビームのプロファイルを測定する蛍光板モ ニタ1台及びチューン測定用のRF-Knockout 電極1台を備 える。このほかにイオンクリアリング電極1台がある。

真空排気系は、各偏向部に800 L/s のチタンゲッターポ ンプ1台と60 L/s のスパッタイオンポンプ1台, 各短直

線部に400 L/s のチタンゲッターポンプ1台及び高周波加 速空洞部に800 L/s のチタンゲッターポンプ1台を設置し ている。さらに、粗引き用として高周波加速空洞にターボ分 子ポンプを1台設置している。この真空排気システムにより, ポンプヘッドで10⁻¹⁰ Torr 台を達成している(150℃, 48h ベーキング後)。ビーム輸送系と JSR の真空は 50 μm 厚のポ リイミド膜で隔てられている。

制御システムは、制御室に置かれた32ビット CPU を採 用したコンピュータを使用してリアルタイム制御を行ってい る。各機器を制御するデバイスコントローラとコンピュータ は光ファイバで結ばれており、ノイズフリーとなっている。 コンピュータにより、各機器の制御と各モニタからの信号を 収集することができる。また、将来ボタン型静電位置モニタ の出力を利用して電子ビームの位置をフィードバック制御す ることも可能なシステムになっている。

ライナックから電子ビームを150 MeV で入射し,300 MeV まで加速後,蓄積する。300 MeV での電子ビームのタウシェック寿命は1時間以上である。

図 **3**(a)に JSR の偏向電磁石から出る放射光の写真を, (b) に光スペクトルの計算例を示す。300 MeV 蓄積時の臨界波長 λc は, 17.3 nm となる。

1989年度以降に、インフレクタ部及び高周波加速空洞部の真空ポンプの増強、モニタ系の強化等を行いながらマシンスタディを進めた結果、1990年7月時点では電子を160mA蓄積することに成功している。1991年には、アンジュレータの組込みを完了し、この挿入装置から光を取り出すことに成功した。

JSR は三菱電機(株)が幹事会社となり、(株)日立製作所、(株) 東芝及び住友重機械工業(株)の4社で製作を担当した。

3. SPring-8の概要⁽⁷⁾

SPring-8は、軟X線から硬X線までの波長領域で高輝度の光源を実現するために、次のような基本的な考えに基づいている。

- (1) 挿入装置を主要な光源にし、 $10\sim20\,\mathrm{keV}$ の X 線が輝度 10^{19} (光子数/s/mm²/mrad²/0.1%バンド幅) 程度で得られること。
- (2) 多極ウィグラーで100 keV 程度のX線が得られること。
- (3) 挿入装置の性能を最大に発揮するために低エミッタンス ビームの蓄積リングであること。
- (4) 挿入装置用の直線部が30本以上は確保できること。
- (5) 電子及び陽電子の両方が蓄積可能なこと。

表 1. JSR の主要パラメータ

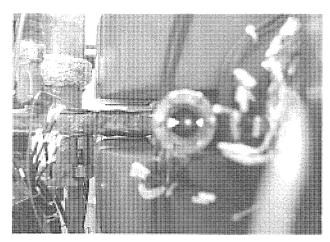
蓄積ビームエネルギー	(MeV)	300
入射ビームエネルギー	(MeV)	150
周 長	(m)	20.546
偏向電磁石の台数	(台)	6
偏向半径	(m)	0.835
偏向電磁石の磁場	(T)	1.2
四極電磁石の台数	(台)	15
		6.8
四極電磁石の磁場こう配	(m^{-2})	4.1
		-5.7
ナチュラル エミッタンス(m	1.1×10 ⁻⁷	
ナチュラル	х	-1.81
クロマティシティ	у	-4.54
チューン	х	2.25
71-7	У	1.25
加速周波数	(MHz)	116.7
高周波電力	(kW)	2
ハーモニック数		8

SPring-8は現在設計中であり、確定していない部分もあるが、現計画の施設概要を記す。図4に全体配置を、図5に光スペクトルを示す。

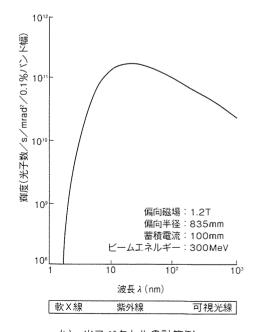
この施設は、大別するとライナック、シンクロトロン、蓄積リングの三つの加速器と多数の光ビームラインから構成されている。ライナック及びシンクロトロンで8GeVのエネルギーまで加速された電子又は陽電子は、蓄積リングに入射され、そこで放射光を発生させる。この蓄積リングには高輝度、短波長の放射光を発生させる挿入装置を多数設置できる。

ヨーロッパやアメリカで建設中の同規模の放射光施設に比べてSPring-8の蓄積リングの持つ特長は、X線のエネルギー、輝度が最も高く、挿入装置の数で最も優れていることと4箇所の36mにも及ぶ長直線部を持っていることである。それぞれの構成機器の主要パラメータを表2に示す。

ライナックでは、シンクロトロンの運転しやすさ、安定性、 及び将来、放射光以外への利用を考えて電子又は陽電子を1



(a) ポートから出る放射光



(b) 光スペクトルの計算例 図3. JSR の偏向電磁石から出る放射光

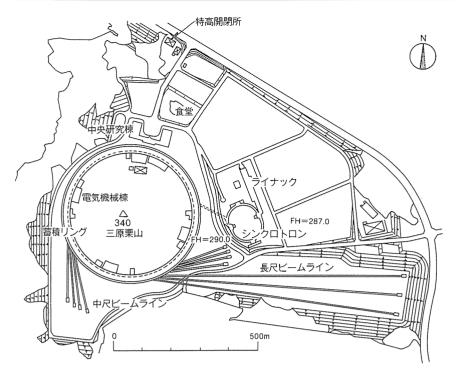


図4. SPring-8の施設全体配置

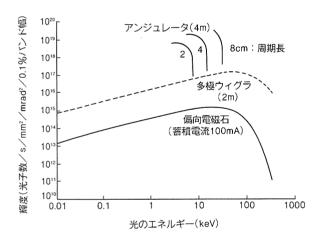


図5. SPring-8の光スペクトラム

GeV のエネルギーまで加速する。ピーク電流は電子で 100~ $300\,\mathrm{mA}$,陽電子で $10\,\mathrm{mA}$ を目標にしており,パルス幅は蓄積リングの運転に応じて $1\,\mathrm{ns}\sim 1\,\mu\mathrm{s}$ である。

シンクロトロンではライナックからくる電子又は陽電子ビームを更に加速し8 GeV のフルエネルギーで蓄積リングへ入射する。ラティスは FODO 型を採用し、40 個のセルからなる周長396 m のレーストラック型である。蓄積リングでの単バンチ運転を可能にするために蓄積リングとの周長比を8/29 としている。エミッタンスは入射効率を考えて約200 nm・rad である。高周波加速空洞は、蓄積リングと同じ加速周波数508.6 MHz の多連セル型を無分散直線部に配置する。

蓄積リングのラティスはチャスマン グリーン型と呼ばれる単位セルを基本とし48セルから構成され, 6.89 nm・radの低エミッタンスを実現する。蓄積リング全体で, 偏向電磁

石88台,四極電磁石480台,六極電磁石336台あり,周長は1,436mである。高周波加速空洞は4箇所の直線部に単セル型各8個を設置する。真空系は蓄積ビームの寿命を20時間程度とするため,10⁻¹⁰ Torr 台の超高真空を達成する。直線部はビームサイズが異なる2種類の部分が交互に繰り返され,それぞれ適した場所にアンジュレータやウィグラーなどの挿入装置が配置される。

光ビームラインは偏向電磁石から取り 出すものを23本程度,挿入装置からの ものを38本計画している。各光ビーム ラインは光源出口から約80mの長さで ある。また,実験課題によっては広い照 射野や平行度の良いビームを使うため, 300m及び1,000mまでの中・長尺ビー ムラインが計画されている。

以下の章では、SPring-8の機器のう

ち,三菱電機(㈱が参加した電磁石について記述し,最後に 現在共同チームで計画されている制御系案を紹介する。

表 2. SPring-8の主要パラメータ

	加速周波数	(MHz)	2,856
	クライストロン出力	(MW)	35
ライナック	繰り返し数	(Hz)	60
	エネルギー	(GeV)	1
	ピーク電流 (e ⁻ /e ⁺)	(mA)	300/10
	入射エネルギー	(GeV)	1
	最大エネルギー	(GeV)	8
	周 長	(m)	396
シンクロトロン	セル数		40
シンクロトロン	繰り返し数	(Hz)	0.5~1
	エミッタンス	(nm·rad)	230
	偏向電磁石磁場(8 GeV)	(T)	0.903
	加速周波数	(MHz)	508.6
	エネルギー	(GeV)	8
	蓄積電流(多バンチ/単バンチ)	(mA)	100/5
	周 長	(m)	1,436
蓄積リング	セル数(通常セル/直線セル	/)	44/4
節似ソンク	エミッタンス	(nm·rad)	6.89
	特性光子エネルギー	(keV)	28.32
	ハーモニック数		2,436
	加速周波数	(MHz)	508.6
	挿入光源ビームライン	(本)	
光ビームライン	標準長挿入光源 長直線挿入光源		34 4
	偏向電磁石ビームライン	(本)	23

4. 電磁石の開発

原研・理研共同チームによって進められている SPring-8 の基本設計の第一段階が終了した時点で、蓄積リング及びシンクロトロン各リングの主要コンポーネントである偏向電磁石,四極電磁石及び六極電磁石の試作に関する引合いが出され、三菱電機(株) は蓄積リング用六極電磁石,シンクロトロン用四極電磁石及び六極電磁石各1台の試作を受注し、製作,納入した。

上記電磁石は、数値解析を用いて設計された磁場分布の検 証及び実機量産化のための実寸大の試作機である。この節で は、これらの試作電磁石の概要について述べる。

4.1 蓄積リング用試作六極電磁石

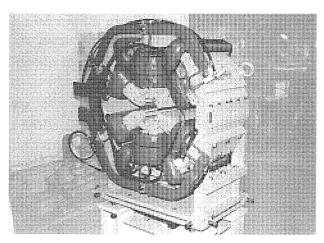


図6. 蓄積リング用試作六極電磁石の外観

表3. 蓄積リング用試作六極電磁石の諸元

項目	主コイル	ステ	テアリンク	ゲ磁場コー	イル
·	エコイル	A1	A2	В	С
ボ ア 径 (mm)	110				
鉄 心 長 (mm)		410			
総質量 (kg)		1,050			
コイル導体断面寸法 (mm)	8.0×8.0 -\$3.5*1	2.		61×4.23 ステル線	3* 2
総起磁力 (A)	48,048	2,815	3,185	1,600	2,620
コイル数	6	2	2	4	4
ターン数 (ターン/コイル)	22	210	238	137	275
電 流 (A)	364	13.4	13.4	11.7	9.5
抵 抗 (Ω/コイル)	0.0095	0.63	0.69	0.41	0.77
冷却回路数	6		_		1
冷却水温度上昇 (℃)	20	_			
冷却水量 (L/min)	5.3	_			***************************************
冷却水管圧力損失 (MPa)	0.3	_			

蓄積リング用六極電磁石は、実機では48のユニットセルからなる1,436 m のリング周上に1セルに7台、合計336台が配置される。1セル7台のうち、3台はクロマティシティの補正に、4台はダイナミック アパーチャの拡大に使われる。

今回の試作六極電磁石の外観を図6に、諸元を表3に示す。図6、表3に示すように、六極磁場発生用の主コイルとは別に、COD 補正のためのステアリング磁場発生用励磁コイルが追加された。ただし、現在進められている実機の設計では、蓄積リングにおける空間の有効利用と将来の拡張性から、これらのステアリング磁場発生用励磁コイルは省略され、独立した電磁石として設置するように変更されている。

鉄心の製作では、高い形状精度が要求される場合でも量産 効果が期待できることにより、通常交流電磁石で採用される けい素鋼板を鉄心断面形状に打ち抜いて積層する方式を採用 し、対称な6分割構造とした。必要な高精度磁場を得るため に、鉄心の製作に要求された形状精度を表4に示す。

六極磁場発生用の主コイルの導体は、材質を無酸素銅とし、 直接水冷方式のため冷却穴をもつ中空角形導体(ホローコン ダクタ)とした。また、ステアリング磁場発生用励磁コイル ではエナメル被覆導体とし、自然空冷方式を採用した。

4.2 シンクロトロン用試作四極電磁石

シンクロトロン用電磁石は主として、偏向電磁石64台、 四極電磁石80台及び六極電磁石60台から構成される。これ らはいずれも0.5~1Hzで台形波励磁されるため、鉄心の 製作には打ち抜きけい素鋼板の積層方式が、磁場発生用コイ

> ルにはホローコンダクタを用いた直接水冷方式 が採用された。

> 試作四極電磁石では、図7に外観を示すように、鉄心の組立工数低減のため、上下2分割構造が採用された。このため励磁用コイルは、組立時に隣り合う磁極先端部の狭い間げきを通すことが必要となり、小型化を図ったので電流密度が上がる結果となった。さらに、冷却水回路は上下のコイルで各1系統の2回路とし、1系統分は電気接続を兼ねてホローコンダクタで直列に接続し、電流リードの構造を簡素化した。

表4. 蓄積リング用試作六極電磁石の 製作に要求された形状精度

	単位:mm
鋼板打ち抜き精度 磁極面 積層基準面・同副基準面 その他	±0.02以下 ±0.02以下 ±0.05以下
加工組立精度 磁極間距離 鉄心長 測量基準面 高さ 平行度 測量基準穴 位置	±0.05以下 ±0.5 以下 ±0.02以下 0.02以下 ±0.02以下

4.3 シンクロトロン用試作六極電磁石

シンクロトロン用六極電磁石では、図8に示すように、試作四極電磁石と同様の上下2分割構造の積層鉄心及び直接水冷の励磁コイルを採用した。励磁コイルの冷却水回路系統数は上下2回路とし、四極電磁石と同様の方法で電流リードの構造を簡素化した。表5にシンクロトロン用試作四極電磁石及び六極電磁石の諸元を示す。

4.4 磁場測定装置

最先端の研究用加速器では、電磁石の構造までを定めた仕様 (構造仕様)で与えられる場合が多いが、一般の商業ベースの加速器ではシステム設計から要求される磁場仕様のみが与えられる場合が増えてきた。また、今回のSPring-8向けの電磁石のように構造仕様であっても高い製作精度が要求されている場合は、これらの製品の品質を確保するため高精度の磁場測定技術を保有することが製作上必要となってきた。

三菱電機(株)神戸製作所では、このような磁場測定技術の 向上と合わせ、測定作業の効率化のために磁場測定装置の整

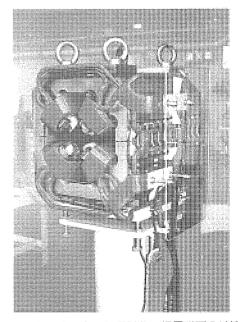


図7.シンクロトロン用試作四極電磁石の外観

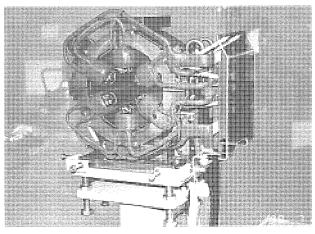


図8.シンクロトロン用試作六極電磁石の外観

備・開発を進め、**図9**及び**表6**に示す偏向電磁石用測定装置を1989年度に完成し、既に製品への適用を図っている。

次いで、四極電磁石、六極電磁石用の多極磁場測定装置について、SPring-8向けの高精度電磁石の測定にも対応できることを目指し、駆動系の精度向上とセッティング時のアライメント及びデータ処理等の自動化等の機能を持った装置の開発を行い、図10及び表7に示す装置を1990年度に完成した。現在、SPring-8向け電磁石への適用に備え、測定精度の検証を進めており、一部製品への適用を図りつつある。

5. SPring-8の制御系⁽⁸⁾⁽⁹⁾

5.1 制御系の概要

SPring-8の制御システムは、ライナック、シンクロトロン、蓄積リングを効率的に運転すること、安全管理等の他の制御システムとの連携を円滑に行うこと、運転員を支援して運転員の負担を軽減することを目的とする。このためには、ライナック、シンクロトロン、蓄積リング及びこれらの設備間を接続するビーム輸送系 (LSBT 系、SSBT 系) やビームラインを高精度かつ円滑に制御する必要がある。また、安全管理システムやデータベースシステム及び外部の計算機等と相互に情報交換することが可能な制御システムを構築する必要がある。

図11 に SPring-8 制御系の全体図を示す。FDDI (Fiber Distributed Data Interface) にライナック、シンクロトロン、蓄積リングの各サブ系を制御する計算機、これらを中央から制御する計算機、データベース/プログラム開発用計算機等を接続する。各サブ系の制御計算機の下層には MAP を介し

表 5 . シンクロトロン用試作四極電磁石・六極電磁石の諸元

頂	E	四極電磁石	六極電磁石
ボア径	(mm)	80	64
鉄心長	(mm)	570	150
総質量	(kg)	1,100	250
コイル導体断面寸法	(mm)	13.9×8.9 −∮4.65*¹	8.0×5.8 -\$\psi_3.3*2
総起磁力	(A)	42,020	22,380
コイル数		4	6
ターン数 (ターン	/コイル)	11	10
電流	(A)	955	373
抵 抗	(m Ω)	12.6	19.4
冷却回路数		2	2
冷却水温度上昇	(℃)	40	30
冷却水量	(L/min)	4.1	1.3
冷却水管圧力損失	(MPa)	0.41	0.25

注 * 1 5 * 2 5 * 3.3

て VME コンピュータやプログラマブル コントローラを接続する。制御対象の中で、速い入出力 (I/O) が必要なものについては VME コンピュータから直接 I/O カードを通し

て制御し、DC電源のように制御点数が多く比較的遅いI/Oでよい場合は、VMEコンピュータの下層にマルチドロップ方式のデータウェイを使用したリモートI/Oシステムを使用して、機器の制御を行うように計画されている。

マルチドロップ方式のデータウェイとしては、RS-485 規格, MIL 1553 B 規格等があり検討中であるが、次節では RS-485 規格を使用した〈I/O バス〉の例について述べる。

表 6. 偏向電磁石用磁場測定装置の仕様

項	I	仕	様
軸数		4	
位置決めスピード	(m/min)	3,500)
位置決め精度	(mm)	(0.03
再現性	(mm)	(0.01
磁場測定精度	(%)	(.005

表7. 多極電磁石用磁場測定装置の仕様

	項	目		仕	様
軸	数			5	
位置	決め精度		(mm)	0.	03
再現	性		(mm)	0.	01
磁場	測定精度		(%)	0.	01
多極	成分測定	幾能		有	· ŋ

5.2 〈I/O バス〉システムの概要

この〈I/O バス〉システムは、フィールドに設置されたフィールド機器 (スレーブ) と計器室に設置された上位のコン

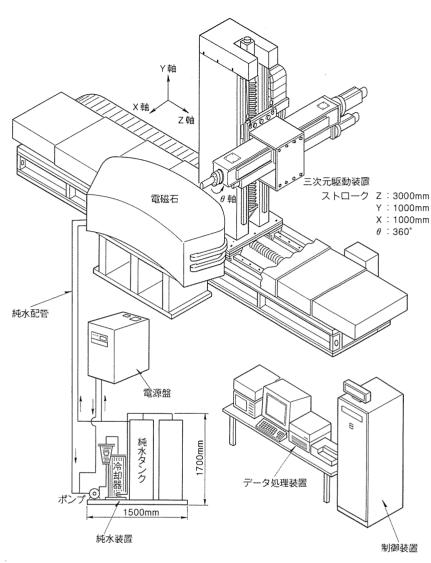


図9. 偏向電磁石用磁場測定装置

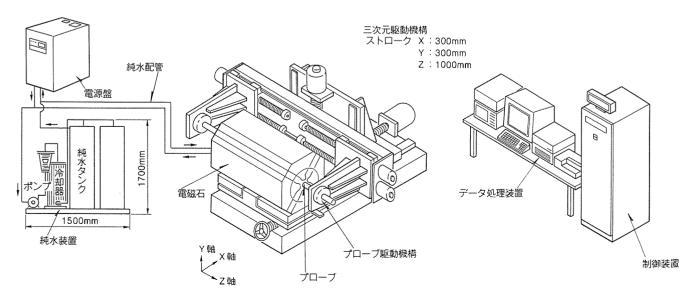


図10. 多極電磁石用磁場測定装置

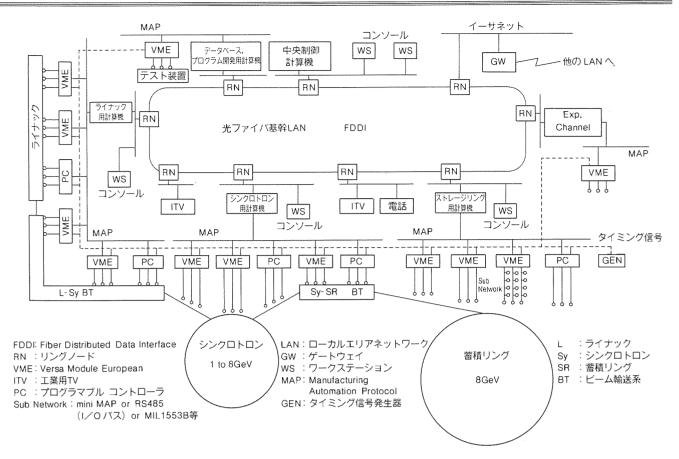


図11. SPring-8制御系全体図

トローラ機器との間を結ぶディジタルのシリアル通信リンクである。〈I/O バス〉は、バスを制御するコントローラ(マスタ)と多数のスレーブから構成される。

〈I/O バス〉には以下に示す特長がある。

- (1) 通信形態は1:Nのマスタポーリング/セレクティング 方式で、一枚のマスタカードで最大62枚のスレーブカード を制御することができる。
- (2) 伝送速度は 1 Mbps (マンチェスター符号) である。
- (3) 伝送レスポンスは、1 スレーブ当たり0.2 ms (送受信とも6 バイトの場合) である。
- (4) 伝送距離、伝送ルートの環境によって伝送媒体の選択ができる。
 - (a) ~30 m ツイストペアケーブル
 - (b) ~300 m 同軸ケーブル
 - (c) ~1km 光ファイバケーブル
- (5) 通信プロトコルは RS-485, HDLC に準拠している。
- (6) RAS (Reliability, Availability, Serviceability) 機能に優れている。
 - (a) マスタカードの二重化対応可能
 - (b) ホスト計算機によるマスタの制御可能
 - ●送信制御モード
 - ●待機モード
 - ●スレーブモード
 - (c) マスタによるオンライン, ループバック試験可能

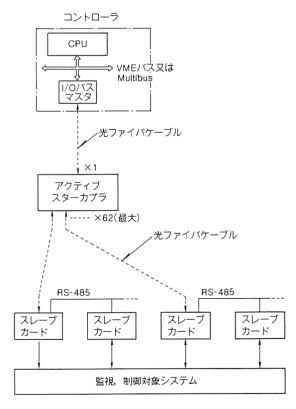


図12. リモート I/O システムの構成例

- (d) マスタに全スレーブのステータス情報を収集可能
 - ●スレーブの使用/不使用
 - ●無応答

●受信エラー

- (7) マルチドロップ方式なので、ケーブル量を減らすことができる。
- (8) 光ファイバケーブルとフローティング電源を組み合わせれば、各スレーブ間及びマスタ・スレーブ間を電気的に絶縁することが可能である。また、光ファイバケーブルを使用すればノイズフリーな伝送が可能となる。

〈I/O バス〉のマスタカードは、マルチバス及び VME バスに対応している。スレーブカードの種類としては以下のものを開発及び検討中である。

- (1) アナログI/O(入出力各1点, 16ビット)
- (2) ディジタル I/O (入出力各32点)
- (3) マルチチャンネル アナログ入力 (16点, 12 ビット)
- (4) 電源制御カード

〈I/O バス〉を使用したリモート I/O システムの構成例 を図12 に示す。

以上述べてきたような〈I/Oバス〉を使用したリモートI/Oシステムを使用すれば、多数のフィールド機器をシンプルかつ確実に制御できるシステムを簡単に構成することができる。

6. む す び

1990年度に、SPring-8の入射系、蓄積リングの一部機器が原研・理研から発注され、本格的な建設が始まった。

この施設は21世紀における先端技術開発の主役として期待されているが、我々もこの官・民一体となった大型プロジェクトに協力し、施設の完成に貢献したいと願うものである。最後に、開発・研究及び計画・設計に御指導いただいている原研・理研共同チームの関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 放射光学会:次世代大型高輝度放射光施設計画に関する 調査報告書,放射光学会誌, 3, No. 3, 205~256 (1990)
- (2) 上坪宏道, 鈴木康夫:大型放射光施設計画, 日本原子力学会誌, **31**, No. 9, 1007~1011 (1989)
- (3) 原見太幹, 横溝英明, 大野英雄, 原 雅弘, 植木龍夫: 大型放射光施設 (SPring-8) の建設計画と利用, 日本 原子力学会誌, **33**, No.4, 310~317 (1991)
- (4) Yokomizo, H., Yanagida, K., Harada, S., Mashiko, K., Yokoyama, M., Hashimoto, H., Nakayama, K., Kabasawa, M., Harami, T., Suzuki, Y.: Performance of the Compact 300 MeV Electron Ring JSR, Nuclear Instrum. and Methods in Physics Research, A 291, 472 ~480 (1990)
- (5) Harada, S., Yokomizo, H., Yanagida, K., Mashiko, K., Ishizaki, N., Tayama, H., Yokoyama, M., Nagai, T., Suzuki, Y.: Status of a Compact Electron Storage Ring JSR, Particle Accelerators, 33, 1729 ~ 1734 (1990)
- (6) Yanagida, K., Yokomizo, H., Harada, S., Yokoyama, M., Nagai, T., Mashiko, K., Ishizaki, Y., Tayama, H.: Present Status of JSR, Proc. of the 7th Symposium on Accelerator Science and Technology, 4 (1989)
- (7) 上坪宏道: SPring-8計画・科学技術庁大型放射光計画, 日本物理学会誌, 46, No.9, 179~186 (1991)
- (8) 和田 雄, 熊原忠士:加速器制御系の設計とR&Dの現 状, SPring-8研究開発報告会, 62~67 (1991)
- (9) 武部英樹, 大西純一, 松井佐久夫, 熊谷桂子, 元永昭七 :SR 電磁石電源設計の現状, SPring-8 研究開発報告 会, 29~37 (1991)

シンクロトロン放射光装置の研究試作

中西哲也* 山田忠利* 奥田荘一郎* 岩本雅民* 中村史朗**

1. まえがき

シンクロトロン放射光装置を当社中央研究所 西部基礎研究棟に建設中である。この装置は電子エネルギー 20 MeV のライナック,最大エネルギー1 GeV の常電導シンクロトロン及び800 MeV の超電導小型蓄積リングからなる。ライナック及びシンクロトロンは既に完成している (1)。シンクロトロンのビーム加速試験ではビーム入射開始後3日目という非常に短期間に1 GeV のビーム加速に成功した。

この装置の目的は、装置の研究試作を通して装置技術を開発し、さらに装置から得られる高エネルギー電子ビーム及び放射光を用いた基礎研究を行うことである。具体的には次のようなテーマが挙げられる。

- (1) 装置技術開発
 - ・シンクロトロン技術
 - 。蓄積リング技術
- (2) 放射光及び電子ビームを用いた基礎研究
 - ・放射光の利用:リソグラフィ, XAFS^(注1), XPS^(注2)
 - 電子ビーム利用:陽電子, 高エネルギーガンマ線, FEL (注3) 等

シンクロトロン放射光装置への関心は近年目覚ましいものがあるが、中でも X 線リソグラフィ用の小型蓄積リングには産業界からの関心が高い。しかし、 X 線リソグラフィ用途の光源として最適な入射エネルギー、装置構成がいまだ明らかになっているとは言い難い。このシンクロトロン放射光装置は上述した構成になっているため、小型蓄積リングにあらかじめ蓄積エネルギーまで加速したビームを入射する方式と低エネルギーで入射して加速・蓄積を行う方式の二通りについて研究することができる。さらに、シンクロトロンは、常電導方式での加速・蓄積技術の研究が行えるように設計している。

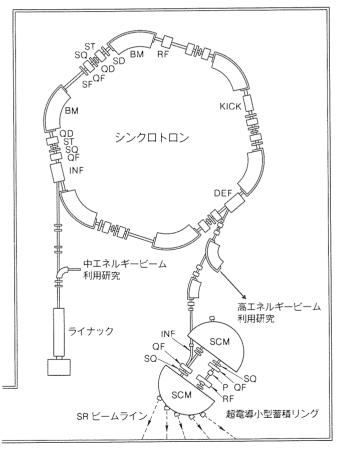
この装置は一企業が持つ加速器施設としては日本最大のものであり、加速器技術、高エネルギー電子ビーム及び放射光利用について高レベルの技術蓄積が達成されると考える。現在、超電導小型蓄積リングを建設中である。

2. 装置の概要

装置の構成を図1に示す。また、完成したシンクロトロンの全景を図2に示す。20 MeV ライナックはシンクロトロンの入射器として使用するが、それ以外にも中エネルギービーム利用、例えば陽電子の研究等にも利用できる。シンクロトロンを小型蓄積リングの入射器として使用する際は800 MeV でビームを出射するが、高エネルギービーム利用に使用する際は、最大1 GeV のエネルギーで出射できる。

3. ライナック

ライナックは当社通信機製作所で製作された。主なパラメ



0 1 2 3m

BM:偏向電磁石,QF・QD:集束用・発散用四極電磁石,

SF・SD:六極電磁石, ST:ステアリング電磁石, SQ:スキュー四極電磁石,

INF: インフレクタ, KICK: キッカ, DEF: デフレクタ,

RF:高周波加速空洞, P:パータベータ, SCM:超電導偏向電磁石

図1.シンクロトロン放射光装置の構成

⁽注1) X-ray Absorption Fine Structure(X線吸収端微細構造)

⁽注 2) X-ray Photoelectron Spectroscopy (X線光電子分光)

⁽注3) Free Electron Laser (自由電子レーザ)

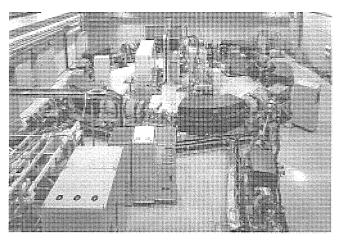


図2.シンクロトロンの全景

ータを**表 1** に示す。加速管は定在波型で、マイクロ波の周波数は $2.856\,\mathrm{GHz}$ の S バンドである。

入射器としてのライナックの性能を評価する上で、出射ビームのエネルギー分散やエミッタンスは重要な量である。筆者等は出射ビームのショットごとのエネルギー及びその分散を測定するシステムを開発した⁽²⁾。このシステムは偏向電磁石とショットごとのビーム強度分布を測定するワイヤーグリッドモニタからなる。また、同じ型のモニタとスリット装置を使ってエミッタンスも測定できる。表1に示したエネルギー分散とエミッタンスは、このシステムを用いて測定した実測値である。シンクロトロンへの入射ビームとして十分な性能を持っている。

4. シンクロトロン

シンクロトロンは20 MeV で入射されたビームを最大1 GeV まで加速し、出射する装置であるが、加速後そのままビームを蓄積する運転もできるように設計した。この装置を 開発するに当たり、主に次のような要素開発を行った。

- (1) リングパラメータ計算用プログラム OCLAT の開発
- (2) 電磁石磁極形状の最適化と扇型積層電磁石の開発
- (3) 入出射器用高速パルス電磁石の開発
- (4) 高周波加速空洞の開発
- (5) ビームモニタの開発

以下にシンクロトロンの設計・製作結果とビーム加速試験 の結果について述べる。

4.1 電磁石の配列(ラティス)

ラティスの設計はシンクロトロンの設計の基本となるものであり、次のことを考慮して最適化を行った。①シンクロトロンが小型であること、②ビームサイズが小さいこと、③電磁石の設置誤差等によるビーム軌道のひずみ(COD)が小さいこと、④運転チューンの安定領域が広いことである。ラティスの最適化に当たり、これらすべてを計算するプログラムとして、筆者等は新たに計算機コードOCLATを開発した。OCLATを使って計算した結果、図1に示した集束用

表1. ライナックの主パラメータ

エネルギー	20MeV
電 流	100mA
パルス幅	2.5 µs
繰り返し周波数	3Hz
エネルギー分散	±0.6%
エミッタンス	1.5πmm·mrad
加速管長さ	1.6m
マイクロ波周波数	2.856GHz

表 2. シンクロトロンの主パラメータ

エネルギー(最大値) 1GeV 34.59m 線り返し周波数 (編向電磁石 磁界強度(最大値) 1.5T (偏向角 曲率半径 2.22m (四極電磁石 磁界こう配(最大値) 9.5T/m の35m (銀板長 130MHz 130MHz 130MHz 130MHz 15 (上、アーモニック数 15 (上、アーモニック数 15 (上、アーン ルェ、ルッ 2.23, 1.21 エミッタンス εx0 (の405πmm・mrad エネルギー分散 じームサイズ σx 0.9mm (偏向電磁石中心) σy 0.5mm バンチ長 σz 76.9mm 放射時定数 τx 9.1ms		
繰り返し周波数 偏向電磁石 磁界強度(最大値) 1.5T 偏向角 60° 出率半径 2.22m 四極電磁石 磁界こう配(最大値) 9.5T/m 磁極長 0.35m 放射損失 40keV/turn 加速周波数 130MHz 加速電圧 100kV ハーモニック数 15 チューン ν _x , ν _y 2.23, 1.21 エミッタンス ε _{x0} 0.405πmm·mrad エネルギー分散 ビームサイズ σ _x 0.9mm (偏向電磁石中心) σ _y 76.9mm	エネルギー(最大値)	1GeV
偏向電磁石 磁界強度(最大値) 信向角 曲率半径 四極電磁石 磁界こう配(最大値) 磁極長 の、35m が射損失 加速周波数 40keV/turn 加速周波数 130MHz 最大加速電圧 ハーモニック数 15 チューン ν _x , ν _y 2.23, 1.21 エミッタンス ε _{x0} 0.405πmm・mrad エネルギー分散 ビームサイズ σ _x 0.9mm (偏向電磁石中心) σ _y 76.9mm	周 長	34.59m
磁界強度(最大値) 1.5T 60° 2.22m 60° 2.22m 9.5T/m 2.35m 60% 60% 60% 60% 60% 60% 60% 60% 60% 60%	繰り返し周波数	2Hz
偏向角 曲率半径	偏向電磁石	
曲率半径 四極電磁石 磁界こう配(最大値) 9.5T/m 磁極長	磁界強度(最大値)	1.5T
四極電磁石 磁界こう配(最大値) 9.5T/m 磁極長 0.35m 放射損失 40keV/turn 加速周波数 130MHz 最大加速電圧 100kV ハーモニック数 15 チューン ν _x , ν _y 2.23, 1.21 エミッタンス ε _{x0} 0.405πmm·mrad エネルギー分散 0.053% ビームサイズ σ _x 0.9mm (偏向電磁石中心) σ _y 76.9mm	偏向角	60°
磁界こう配(最大値) の.35m の.35m の.35m の.35m が射損失 が連電圧 100kV 15 によっク数 15 によっクンス をx0 の.405πmm・mrad エネルギー分散 ビームサイズ σx (偏向電磁石中心) σy バンチ長 σz 76.9mm	曲率半径	2.22m
磁極長	四極電磁石	
放射損失 40keV/turn 130MHz 130MHz 130MHz 100kV $1-\epsilon = \sqrt{2}$ 15 15 15 15 15 15 15 15	磁界こう配(最大値)	9.5T/m
加速周波数 130MHz 100kV 15 15 15 2.23, 1.21 2.23, 1.21 2.23, 1.21 2.24 2.25 2.25 2.25 2.25 2.25 2.25 2.25	磁極長	0.35m
最大加速電圧 $100 \mathrm{kV}$ $100 \mathrm{kV}$ 15 15 15 15 15 15 15 15	放射損失	40keV/turn
γ ハーモニック数 15 2.23, 1.21 γ 15 2.23, 1.21 γ 2.24, γ 3.25 γ 0.9mm γ 0.5mm γ 0.5mm γ 76.9mm	加速周波数	130MHz
チューン ν_{x} , ν_{y} 2.23, 1.21	最大加速電圧	100kV
エミッタンス ϵ_{x0} $0.405\pi mm \cdot mrad$ $1.405\pi mm \cdot $	ハーモニック数	15
エネルギー分散 0.053% $U- \Delta サイズ \sigma_x = 0.9 \text{mm} \sigma_y = 0.5 \text{mm} \sigma_z = 0.5 \text{mm} \sigma_z = 0.5 \text{mm} \sigma_z = 0.5 \text{mm} \sigma_z = 0.5 \text{mm}$	チューン ν _x , ν _y	2.23, 1.21
ビームサイズ σ_x $0.9 mm$ $(偏向電磁石中心) \sigma_y$ $0.5 mm$ $バンチ長 \sigma_z$ $76.9 mm$	エミッタンス ϵ_{x0}	0.405 πmm·mrad
(偏向電磁石中心) σ_y 0.5mm σ_z 76.9mm	エネルギー分散	0.053%
バンチ長 σ_z 76.9mm	ビームサイズ σ_{x}	0.9mm
*	(偏向電磁石中心) σ _y	0.5mm
放射時定数 $ au_x$ 9.1ms	バンチ長 σ_z	76.9mm
	放射時定数 r _x	9.1ms

四極電磁石(QF)と発散用四極電磁石(QD)を隣接させた6 角形構造が最適であることが分かった。シンクロトロンの主 なパラメータを表2に示す。

偏向電磁石は、最大磁界強度を1.5 Tとし扇型とした。く 形型の偏向電磁石は、製作は容易であるが強い磁界で使用す る場合鉄心の磁気飽和によって集束力が変化するという問題 があり、採用しなかった。六極電磁石はビームエネルギーの 広がりによる収差を補正するために設置した。集束用、発散 用四極電磁石の間には、垂直方向(y)軌道補正用ステアリン グ電磁石と電子の水平(x)、垂直運動を結合させるスキュー 四極電磁石を設置した。水平方向の軌道補正は、偏向電磁石 のトリムコイルで行う。

4.2 電 磁 石

電磁石は2Hzの交流運転をするため、渦電流による磁界分布の乱れを避けるために、厚さ0.35mmのけい素鋼板を

積み重ねた積層型とした。電磁石設計に当たって特に考慮し た点は、①磁界分布の広領域高均一化、②電磁石の有効長 の一様化, ③励磁電流変化による磁界均一度と有効長の変 化の最小化である。このシンクロトロンは加速器研究のため の装置としての意義があるため、様々なチューンで運転でき るようにしておく必要がある。すなわち運転チューンによっ てはビームサイズが大きい場合もあり、それらすべてを満足 するために電磁石は特に広い領域で高均一磁界が必要となる。 もし磁界分布が不均一であると、ビームに非線形な力が加わ り発散してしまうとか、ビームのチューンにある幅が生じ共 鳴によるビーム損失をまねきやすいなどの問題が生じる。し たがって、計算機を使って磁極形状の最適化を行った。また、 磁極端部の磁気飽和により、有効長が励磁電流に依存して変 化すると、加速中に COD が大きくなってビーム損失の原因 となる。そのため、励磁電流による有効長の変化を小さくす るように、磁気飽和特性を考慮して磁極端部形状の最適化を 行った。

偏向電磁石と四極電磁石の磁界均一度の測定結果を**表3** に示す。これらは最大定格にほぼ等しい B_0 =1.54 T, G_0 =9.69 T/m で測定したものである。偏向電磁石の不均一度は十分に小さく,ビームに与える非線形力は小さい。四極電磁石の不均一度から計算されるチューンの幅は, ± 0.006 以下であり十分に小さい値である。また,中心磁界強度が0.16 T から1.5 T まで変化する間の偏向電磁石の有効長 $(L_{\rm eff})$ を測定した結果,その変化は $\Delta L_{\rm eff}/L_{\rm eff} \le 2.4 \times 10^{-3}$ という小さい値を得た。

4.3 入出射機器

ライナックからのビームは、3台のパルス電磁石 (パータベータ) で作られた入射軌道に静電型インフレクタを通して入射する。加速したビームは高速パルス電磁石 (キッカ) を使って軌道を外側に寄せ、中心軌道から 40 mm 外側に位置するセプタム電磁石 (デフレクタ) に導き、シンクロトロンから取り出す。1 GeV のビームを対象とするキッカとデフレクタは高磁界が発生できるように設計し、コンパクト化を達成した。

キッカは高速パルス磁界を発生するためにフェライトコア と1ターンのコイルとからなる。このシンクロトロンでは電

表3. 偏向電磁石中心における磁界均一度と 四極電磁石の磁界こう配均一度

	領域	測定値
偏向電磁石 Δ <i>B/B</i> ₀	$ x \le 39 \mathrm{mm}, y \le 9 \mathrm{mm}^{*1}$	±1.3×10 ⁻⁴
四極電磁石*2 Δ(GL)/(GL) ₀	$ x \le 64 \mathrm{mm}, y \le 10 \mathrm{mm}$	±3×10 ⁻³

注 *1 x, y はビーム軸に対して垂直な平面内の座標である。
 *2 四極電磁石は長さが短いため,一般に磁界こう配のビーム
 軸に沿った積分値(GL)の均一度で表される。

子の周回時間が115 ns と短いので、取り出し効率を上げるためにパルス磁界の立ち上がり時間を極めて短くする必要がある。筆者等はキッカ電源にブルムライン回路を採用し、立ち上がり時間40 ns という高速パルス磁界の発生に成功した(3)(図3)。また、最大磁界として1kGを達成し、キッカ全長を0.6 m と短くできた。

デフレクタは積層鉄心に1ターンコイルを巻いたもので、3ms幅のパルス磁場(正弦半波)を発生する。種々の検討の結果、2.3mm厚の薄いセプタム(周回ビームに面した側のコイル)を用いて1.75Tの高磁界を達成した。この時のパルス電流のピーク値は14kAである。セプタムに大電流を流すと強い反発力が生じるためにセプタム支持板の構造が重要となる。この装置の特徴はその支持板に流れる渦電流を利用してビーム軌道への漏れ磁界を少なくし、更にギャップ内の磁界均一度も高くなる構造としたことである(4)。

4.4 高周波加速空洞

高周波加速空洞は内径0.6 m のリエントラント型で、加速 周波数は130 MHz である。プランジャにより、共振周波数 を±500 kHz 変えることができる。空洞の材質は、一般には 銅とステンレス鋼のクラッド板又はステンレス鋼に銅めっき したものが使用されるが、この空洞はすべて銅で製作した。 これにより、全体を一定温度に冷却・保持できる。現在安定 に稼働している。

表 4 に高周波加速空洞のパラメータを示す。

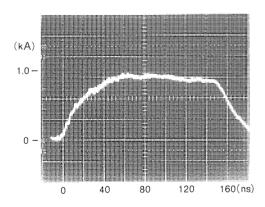


図3.キッカ電磁石のコイル電流波形

表4. 高周波加速空洞のパラメータ

空洞内径	600mm
空洞長さ	350mm
ドリフトチューブ半径	160mm
加速間げき	12.2mm
Q 值	13,000
シャント抵抗	0.93МΩ
最高電界強度	11kV∕mm
結合係数	1.80
位相角	0~-51°

4.5 真 空 系

シンクロトロンではビーム入射後 250 ms 後にはビームを取り出すために、ビーム寿命をこれより十分に長くするのに必要な真空度としては約 10^{-6} Torr でよい。しかし、この装置では加速後そのまま蓄積する方式も考えているため、真空排気系は偏向電磁石の真空ダクトをポンプ内蔵型のものに替えれば、ビーム蓄積時 10^{-9} Torr が達成できるように設計した。

真空ダクトは、渦電流による誤差磁界の影響を小さくするためと、機械的強度を持たせるために厚さ 0.3 mm のベローズ型とした。

現在の真空度は、場所によって異なるがポンプヘッドで $1 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-9}$ Torr である。

4.6 ビームモニタ

ビームモニタは周回ビームの位置や強度に関する情報を与えるもので、シンクロトロンの運転調整に重要な役割を果たす。筆者等は以下に述べる様々なモニタの試作研究を行い、シンクロトロンに適用した。

(1) 高速 CT⁽⁵⁾

入射時のビーム強度を測定するモニタで、立ち上がり時間 $0.1\,\mu s$,電流測定感度は $2.4\,V/A$ である。ノイズ対策のために、フェライトコアの周りはビームに面した側以外は完全にアルミ板でシールドした。

(2) 直流電流測定用 CT (DCCT) (6)

加速電流値を測定するモニタである。従来の2コア式でなくコンパクトな1コア式を開発した。ワイヤに直流電流を流した単体試験では最小測定電流として0.1 mAを得た。

(3) ボタン型位置モニタ

4個のボタン型電極で静電的にビーム信号を測定し、ビーム位置を計算するモニタである。高精度加工・組立てにより、ビーム位置測定精度は0.1 mm であることを確認している。モニタはノイズ対策のために直流的には信号処理系と絶縁している。このモニタにより、入射時及び加速途中のビーム位置を精度良く測定できている。

(4) 蛍光板モニタ

セラミックスにビームが当たった時に発光する蛍光をカメラで観測する。加速・蓄積運転をする場合、ビーム不安定性を抑えるために真空ダクトは壁電流が円滑に流れる構造としなければならない。そのため、モニタを引き出したときには挿入口が金属メッシュでふさ (寒) がる構造とした。

(5) ビームスクレーパ

厚さ1mmのステンレス鋼を水平,垂直方向計4箇所から独立に真空ダクト内に挿入できる。開口部可変型スリットとしても使用できる。加速・蓄積運転を考慮して,挿入部にはRFコンタクタを使用し,スクレーパとダクトが電気的に一様に接触する構造とした点が特徴である。

なお、このシンクロトロンには上述のモニタ以外にも、ベ

ータトロン振動数測定用 RF ノックアウト電極, 壁電流モニタ, SR 光モニタ及びγ線モニタを取り付けてビーム試験を行っている。

4.7 制御システム

図4に制御室の全景を示す。この制御システムは放射光装置の自動運転を目標に設計した。ビーム信号はCAMAC及びGPIBを通して制御用コンピュータに取り込まれる。制御用コンピュータとして9台のパーソナルコンピュータがあり、それらはRS-232Cでホストコンピュータから指令が送られる。また、すべてのコンピュータはイーサネットでつながっていて大量の信号伝送が可能である。

ビーム信号データの収集及び機器制御は、2台のコンソールコンピュータから独立にでき、同時に2種類の機器制御ができる。制御方式は操作性の良いマウスを使ったメニュー選択方式である。

4.8 ビーム加速試験

このシンクロトロンは、ビーム入射開始後わずか3日目に1GeV加速に成功した。各機器の製作、単体試験及び電磁石のアライメントを設計どおりに実施した結果と考える。図5は加速ビームから放射される放射光である。また、図6はDCCTで測定したビーム信号であり、加速中のビーム強度を

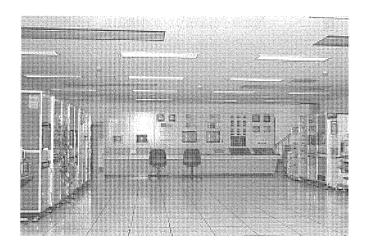


図4.制御室の全景

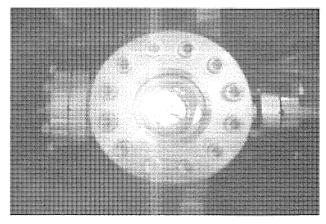


図5.シンクロトロンからの放射光

示したものである。

5. 超雷導小型蓄積リング

超電導小型蓄積リングの主パラメータを表5に示す。蓄積エネルギーは800 MeVで、放射光の臨界波長は0.65 nmである。放射光のスペクトルを図7に示す。X線リソグラフィを目的とした超電導小型蓄積リングのエネルギーは一般に500~700 MeV、臨界波長は1.0~1.5 nmに選ばれているが、この装置は物質構造解析等への利用も考慮して、より高いエネルギーに設定した。ビーム寿命は4 h 以上を目標に設計した。

以下にラティス設計とビーム軌道計算結果について述べる。 5.1 ラティス設計

直線部を持つ蓄積リングで最も小型化できる形状はレーストラック型である。しかし、シンクロトロンのようにQF、QDの2台の四極電磁石を持つレーストラック型では、ビームサイズが大きくなる問題があった。筆者等はビームサイズを小さくできるラティスの検討を行った結果、偏向電磁石に磁界こう配(四極成分)を持たせることによってビームサイズは小さくでき、さらにQDが不要になることが分かった。四極電磁石を直線部当たり1台とすることにより、よりコンパクトな装置となる。

図1に示した超電導小型蓄積リングの構成は,上記検討に基づいて設計したものである。リングは2台の超電導偏向電磁石と各直線部に1台の常電導四極電磁石を持つレーストラック型である。周長は9.2 m であり,コンパクトに構成されている。超電導偏向電磁石の偏向磁界は4.5 T で,電磁石中心付近で約 $0.45\,\mathrm{m}^{-2}$ (n=0.16) の磁界こう配を持つ。また,漏れ磁界を抑えるために鉄シールドを用いる。その他,電子の水平,垂直運動の結合度を任意の値に設定するためにスキュー四極電磁石を直線部に1台設置した。

運転チューンは ν_x =1.38, ν_y =0.43 である。このときのエミッタンスは $1.2\,\pi$ mm・mrad であり,偏向電磁石中

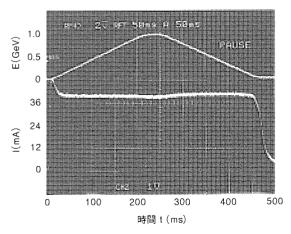


図6. DCCTで観測したビーム信号(下)と 偏向電磁石コイル電流波形(上) (コイル電流はビームエネルギーで表した。)

心のビームサイズは σ_x =0.7 mm, σ_y =0.9 mm と小さい。 ビーム入射はセプタム電磁石と 1台のパルス電磁石 (パータベータ) を用いて行う。これらのパルス電磁石もシンクロトロン同様、コンパクト化のために高磁界が発生できるように設計した。

5.2 ビーム軌道計算

電磁石に誤差磁界が存在すると電子ビームは広がり、場合によっては真空ダクトに衝突して周回できなくなる。そのため、あらかじめビームトラッキング(ビームの周回運動を計算機でシミュレーションする。)により、どの程度までの誤差磁界が許容できるか把握する必要がある。特に超電導電磁石の場合、通常の常電導電磁石よりも誤差磁界が大きいため

表 5. 超電導小型蓄積リングの主パラメータ

エネルギー	0.8GeV
電 流	220mA
臨界波長	0.65nm
周 長	9.2m
偏向磁界強度	4.5T
中心付近の n 値	0.16
曲率半径	0.593m
四極電磁石磁界こう配	12.8T∕m
放射損失	56keV∕turn
加速周波数	130MHz
最大加速電圧	120kV
ハーモニック数	4
$f_{\perp} - \nu_{x}, \nu_{y}$	1.38, 0.43
エミッタンス ϵ_{x0}	1.2πmm·mrad
エネルギー分散	0.079%
ビーム径 σ_x	0.7mm
(SCM 中心)	0.9mm
バンチ長 σ_z	69.3mm
放射時定数 τ _x	1.7ms
寿命	4h 以上

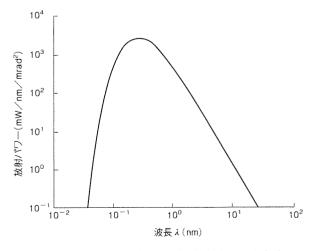


図7. 超電導小型蓄積リングの放射光スペクトル

ビームトラッキングが重要となる。

筆者等は、従来のビーム トラッキングコードよりも更に 厳密で精度の良い計算機コードを開発した。その詳細は別稿 (7)で述べるが、前節のラティス設計結果と電磁石設計結果 を基にビームトラッキングした結果、この蓄積リングは十分 に広い安定ビーム周回領域が得られることを確認している。

6. む す び

現在、当社の西部基礎研究棟に建設しているシンクロトロン放射光装置について述べた。放射光は超電導小型蓄積リングで発生させる。その入射器であるシンクロトロンは既にビーム加速に成功している。1 GeV までのビーム加速は3日という非常に短期間で達成したが、これは各機器を設計どおりに製作した結果と考える。超電導小型蓄積リングは現在製作中であり、計算機によるビームシミュレーションでは十分に広い安定ビーム周回領域が得られることを確認している。1992年には放射光が得られる予定である。

参考文献

(1) Okuda, S., Nakanishi, T., Ikegami, K., Nakata, S., Nakagawa, T., Tsukishima, C., Maruyama, A., Tanaka, H., Nakamura, S., Kodera, I., Yamamoto, S., Matsuda, T.,

- Fujimura. S., Itagaki, H., Yamada, T., Iwamoto, M.: A High Energy Electron Beam Facility for Industrial Research, Proceedings of Particle Accelerator Conference, U. S. A. (1991)
- (2) Nakanishi, T.: Measurements of Emittances and Momentum Spectra of a 20 MeV Electron Linac Beam, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 277, 313~318 (1989)
- (3) Tsukishima, C. and Nakata, S.: Experiment of doubleended blumlein line modulator, Proceedings of the General Meeting of the Institute of Electrical Engineers of Japan, IEEJ, Page 7. 20 (1989)
- (4) Tsukishima, C. and Nakata, S.: 小型シンクロトロンからの荷電粒子取り出し用パルス電磁石の開発, 平成元年電気関係学会関西支部連合大会, G 27 (1989)
- (5) 池上和律, 糸賀賢二:電子加速器用高速電流モニタの試 作, 第42回日本物理学会年回予稿集, 12 (1987)
- (6) 糸賀賢二,中田修平:新方式の直流ビーム電流モニタ, 日本物理学会秋の分科会予稿集 (1989)
- (7) 奥田荘一郎,中田修平,田中博文,山本俊二,板垣秀信,池上和律:電磁界解析とビーム シミュレーション,三菱電機技報,65, No. 11, 1106~1111 (1991)

放射光装置用高性能ライナック

塩田 勝*

1. まえがき

放射光の利用に関する研究が我が国で活発となり、諸研究 機関、企業で放射光施設が建設され、また幾つかの計画が発 表されている。

科学技術庁が西播磨テクノポリスに建設を決定した世界最大の大型放射光施設 (SPring-8) は、日本原子力研究所と理化学研究所が共同で建設に着手した。

放射光施設の3大構成機器の一つである入射用ライナック (他はシンクロトロンと蓄積リング) については数台の製作 実績もできた。

この機会に、三菱電機(㈱のライナックの歴史を技術面から振り返り、入射用ライナックの要素技術の現有技術力及び 今後の技術上のブレークスルーポイントの洗い出しを行った。

2. 要素技術

ライナックを支える要素技術は多岐にわたるが、主な要素 技術及びそれに支えられた構成機器は以下のとおりである。

(1) 大電力マイクロ波技術

電子を加速する加速管,電子を加速するエネルギーであるマイクロ波を発生させる大電力パルスクライストロン及びマイクロ波をクライストロンから加速管まで伝送する大電力立体回路等である。

(2) 大電力パルス及び高電圧技術

クライストロン及び電子銃をパルス変調するパルスモジュ レータ。

(3) ビーム誘導技術

電子銃及び加速された電子ビームの集束、偏向のための電 磁石等である。

(4) 真空技術

加速管内を高真空に維持するためのイオンポンプ, ターボ 分子ポンプ等の真空ポンプ及び真空度をモニタする真空計等 である。

以上の外に加速管を製作するための精密機械加工技術, ろう付け技術, 真空容器を構成する機器を高真空にて使用可能 にする処理技術, 放射線技術, 制御技術等によって支えられ ている。

3. ライナックの歴史

当社におけるライナックの歴史は、1959年ごろ、当時の

当社中央研究所におけるライナックの研究に始まり、今日まで30年以上を経過したエポック的なライナックとその習得技術について振り返ってみる。

(1) 東北大学向け300 MeV ライナック

1963年から1967年の4か年にわたって建設した東北大学向け300 MeV電子ライナックは、当時としては世界第2位の大型ライナックであり、20余年を経過した現在も稼働している。

このライナックは東北大学の指導のもとに三菱重工業(株) と共同で建設したもので、当社中央研究所の総力を上げて研 究開発、設計、製作を行った。

このライナックの完成によって**2章**で述べた要素技術は一 応すべて習得した。その後の技術革新によって種々の改良は 加えられたが、ほとんど原形のまま入射用ライナックとして 現在も使用している機器、技術は、

(a) 大電力立体回路 (1)

移相器,減衰器,マイクロ波気密窓,方向性結合器など すべての大電力立体回路の設計,製造技術。

(b) パルスモジュレータ⁽²⁾

パルスモジュレータの出力パルス電圧は250kV,パルス電流270Aで、当時としては画期的なパルスモジュレータであった。このパルスモジュレータは、20数年を経過した現在においても、当社が生産している最大出力のパルスクライストロンPV-3035を負荷として運転できるものである。

(2) 産業用, 医療用ライナック

1965年ごろから原子力発電所,化学プラントの建設ブームとなり圧力容器の非破壊検査機器として従来のコバルト60,ベータトロンに代わる強力なX線源の登場が望まれていた。

東北大学 ML-300 ライナックの建設で習得した技術を応用して、非破壊検査用ライナック ML-15 R 形を開発し、これを機に当社通信機製作所に機種移管され、その後、ML-5 R 形、ML-1 R 形等のシリーズ化を行い、現在までに国内外に約150 台を出荷し、非破壊検査業界に寄与している。

一方,通信機製作所移管と同時にがんの治療機として,医療用ライナック ML-15 M 形を開発したのを皮切りに,ML-4 M 形,ML-20 M 形など医療用ライナックのシリーズ化を完成し,現在までに国内外を含めて約300台を出荷し,医療業界に寄与している。最近は米国を中心に,輸出に力を入れ,着実に実績を上げている。

非破壊検査用,医療用ライナックを合わせて約450台の製作実績により,種々の技術的改善を通して品質の安定化,コスト低減が図られ,入射用ライナックの技術の下支えとなっている。

(3) ML-4 M 形ライナック

エネルギー $4 \,\mathrm{MeV}$ と小型の医療用ライナック ML - $4 \,\mathrm{M}$ 形を 1974 年に開発し、加速管として定在波形加速管を初めて採用した。

計算機の発達に伴い、ビームダイナミックスの計算もこのころから本格的になり、ビームのバンチング特性の良い定在波形加速管が開発された。この特性を生かして、当社が放射光用ライナックとして納入した4台のうち3台についてはバンチャ加速管として、定在波形加速管を採用した。

(4) 東京大学向けML-35Lライナック

パルス幅 20 ps, 電荷量 1 nc, エネルギー 35 MeV のシングルビームの発生に成功し,物質反応の高速過渡現象の解明に寄与した。シングルバンチビームの発生は,2 ns のグリッドパルサで発生した電子ビームを1/6 周期のサブハーモニック バンチャ及びプリバンチャによって行った。

放射光 (X線) による物質反応の高速過渡現象の解明も放射光の利用の柱であり、放射光施設の入射用ライナックでシングルバンチビーム又は1ns 以下の極短パルスビームを発生させる技術は重要である。

(5) 高エネルギー物理学研究所向けクライストロン

高エネルギー物理学研究所の2.5 GeV ライナック用として客先の指導のもとにパルス電力30 MW のクライストロンPV-3030 を開発した。

東北大学の $300\,\mathrm{MeV}$ ライナックでは、バリアン社のクライストロン TV - $2014\,\mathrm{を使用}$ したが、当社中央研究所時代から開発していたパルス電力 $5\,\mathrm{MW}$ のクライストロン PV - $2012\,\mathrm{e}$ 製品化し、それ以後の産業用、医療用ライナックではこれを使用してきた。

(6) 電子技術総合研究所向け加速管

電子技術総合研究所の500 MeV ライナック用として進行 波形加速管を20本納入したことにより、設計、製造技術は 完成の域に達した。

加速管も東北大学300 MeV ライナック以来, 当初は三菱 重工業(株)から供給を受けていたが, 順次小型の加速管から 当社のろう付け加速管に切り替えていった。

(7) 大阪大学向け加速管

大阪大学産業科学研究所に高電界加速用として進行波形加速管を納入し、大阪大学で実用加速電界として約19 MeV/mを達成し、従来の約2 倍の高電界加速に成功した。

この事実により、大型放射光用ライナックでも高電界加速 に踏み切られたようである。

4. 入射器用ライナックの重要技術

このころから放射光装置の入射用ライナックの需要が高まり、1982年に分子科学研究所に第1号機を納めた。

このライナックは、産業用 ML-15 R 形ライナックをマイナチェンジしたものであり、本格的な入射用ライナックとして設計したものは、日本電信電話(株)に1987 年納入したものが第1号機であり、当社中央研究所に第2号機、(株)ソルテックに第3号機を納入した。

(1) 日本電信電話(株)向けライナック

入射用ライナックとして出力ビームに課せられる必要条件 の最重要項目は、

- (a) エネルギー分散が小さく、エネルギーが安定である。
- (b) エミッタンスが小さい。 である。

エネルギー分散を小さくするためには、ビームバンチ幅を 小さくすることが必要で、そのためにバンチング特性の良い 定在波形バンチャ加速管 (3) を使用すると同時にプリバンチャ 2 個を直列にしたダブルプリバンチャをバンチャ加速管の 前に設置し、バンチング特性を更に改善した。

一方,エミッタンスを小さくするためには,ビーム加速軸 方向に直角な径方向加速を小さくすることが必要である,そ のために集束磁場としてヘルムホルツコイルを使用した。

同時に集束磁界中に置かれた加速管でのビームダイナミックスを三次元で計算し、ビームエミッタンスの定量計算する 技術を習得した。

(2) (株) ソルテック向けライナック

前述の径方向加速により、ビームエミッタンスが増大することを極力抑えると同時に、低エミッタンスの電子銃を使用することが小さなエミッタンスのビームを得るための必要条件である。

このライナックでは低エミッタンス電子銃の開発を新たに行い、従来の入射用ライナック電子銃の約半分の $10\pi mm$ ・mrad (計算値) のエミッタンスが得られた。

以上, 3章, 4章で述べた習得技術, 構成機器の一覧を表 1 に示す。

図1は㈱ソルテック向け40 MeV ライナックの全景であり、図2は同ライナックの平面図で表1に記載した機器の位置を示してある。

ソフト面でも計算機の発達,高精度プログラムの開発によって,従来の製造プロセスであった計算機によるシミュレーション→試作→マイナチェンジ→製作→試験が計算機によるシミュレーション→製作→試験の製造プロセスとなり,大幅に短縮された。

特に電子銃、加速管等は工学的には計算結果と試験結果が よく一致している。

5. 入射用ライナックの性能

放射光装置の入射器として設計された3台のライナックの

表1. 習得した技術と構成機器

年 度	習得した技術、機器	ライナック名
1967	(1) 大電力立体回路(2) パルスモジェレータ(3) ライナック設計,製造技術全般	ML-300 東北大学
1974	定圧波形バンチャ加速管	ML-4M
1977	シングルバンチビーム加速技術	ML-35L 東京大学
1979	30MW クライストロン	高エネルギー物理学 研究所
1980	進行波形加速管	電子技術総合研究所
1986	高電界進行波形加速管	大阪大学
1987	(1) ダブルプリバンチャ(2) ヘルムホルツコイル(3) 磁界中のビームダイナミックスの 計算技術	ML-13L 日本電信電話(株)
1988	低エミッタンス電子銃	ML-40L (株)ソルテック

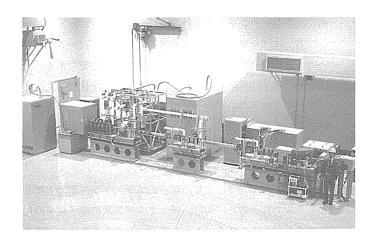


図1.(株)ソルテック向けライナック全景

主要性能の実績値を表2に示す。

3 台共にビームエネルギー, ビーム電流が異なるために, 単純にエネルギー幅, エミッタンスの大小で比較することは できないが, 各ユーザーに満足していただいている。

次に(株)ソルテック向けライナックの構成,主要パラメータの設計値及び結果について述べる。

三極管タイプの電子銃 (カソードはY646 B 使用) に90 kV の加速電圧を加え,発生したビーム電流のうちエミッタンスの小さい中心部のビーム電流のみを取り出すために,電子銃の直後に直径2mmのスリットを設け周辺部を除去している。電子銃はスリット通過電流が200 mA 以上となるように設計した。

ダブルプリバンチャの前段に5 kVP,後段に15 kVPの電界を加え,75% (270° 相当)のビーム電流を 50° にバンチングして,9 空洞の定在波形バンチャ加速管(マイクロ波電力2 MW)で5.3 MeV まで加速すると同時にバンチ幅を 50° から 5° まで1/10 に圧縮する。

主加速は $2\pi/3$ モード進行波形加速管 (マイクロ波電力各8MW) を2本使って行い、 $40\,\mathrm{MeV}$ まで加速する。

表3は主要ビーム性能の設計値と実測値である。特筆すべきは、放射光装置用ライナックにとって重要な出力ビームのエネルギー幅とエミッタンスが設計値に対し、各々2倍、5倍以上に良いことである。これは低エミッタンス電子銃の使用と更にスリットにより、エミッタンスの小さい中心部のビームを利用したことが第一原因であると考えている。

図3は出力ビームのエミッタンス、図4はエネルギースペクトルの実測値である。従来に比べエネルギースペクトルは、半値幅が小さいだけでなく、中心エネルギーの前後のエネルギー成分がほとんどなく、シャープに切れていることが特長

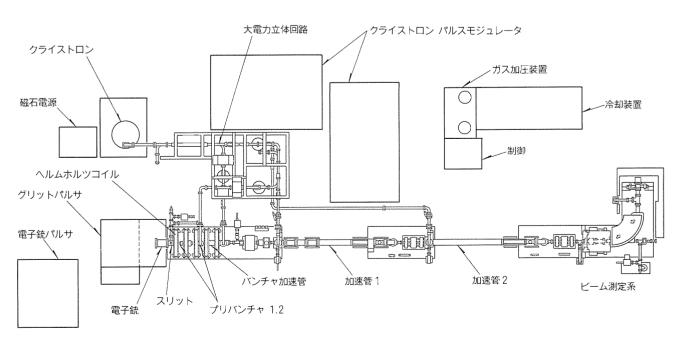


図 2 . 40MeV ライナックの平面図⁽⁴⁾

表 2. 放射光装置用ライナックのビーム性能⁽³⁾⁽⁴⁾

	三菱電機(株) 中央研究所	日本電信 電話(株)	㈱ソルテック
Energy (MeV)	20	15	40
Gun emission (mA)	200	450	210
Beam current(mA)	100	270	130
Pulse width (µs)	2, 3.5	2	1.7
Emittance (π mm·mrad)	1.5	2.1	0.7
Δ <i>E</i> / <i>E</i> (FWHM)(%)	< ±0.6	<±0.5	±0.67

表3. ビーム性能の設計値と実測値(4)

項 目	実 測 値	設計値
Gun emission	210m A	200 m A
Energy(buncher)	6.5MeV (2.4MW)	5.3MeV (2MW)
Emittance (buncher)	2.4πmm·mrad	
Energy (output)	40MeV	40MeV
Beam current (total)	130mA	150mA
Beam trapping effi.	62%	75%
Beam current (useful)	60~80mA	30 m A
Pulse width	1.7 µs	1.5 µs
$\Delta E/E$ (FWHM)	±0.67%	±1.5%
Beam size	±1.5mm	±2mm
Beam divergence	±0.6mrad	±3mrad
Emittance (output)	0.7πmm·mrad	3.8πmm·mrad

である。このことは、ダブルプリバンチャとバンチャ加速管 で構成しているバンチングシステムが良好に動作し、設計ど おりのバンチングが行われていることを示している。

6. 大型放射光用ライナック

このライナックは、電子、陽電子を加速できる特長を持っている全長約120mのライナックである。電子を約200MeVまで加速した所に設けたターゲットで、発生する陽電子・電子のうち陽電子を選択的に加速し、陽電子ライナックとして動作させるモードと、ターゲットを除いて電子をそのまま追加速する電子ライナックとして動作させるモードの二つの運転モードがある。陽電子のエネルギーは約1GeV、電子のエネルギーは >1GeVに加速する計画であると発表されている。

技術的なブレークスルーポイントの主なものは、

- (1) パルス幅1 ns のビーム電流を発生させる電子銃とグリッドパルサ。
- (2) ビーム電流が径方向加速を受け、途中で加速管に衝突して消滅する BBU 現象、この現象は全長の長い高エネルギーライナックで起こりやすい。
- (3) 出力ビームのエミッタンス,エネルギー半値幅が小さいことの外に,もう一つエネルギーが時間的に安定であること。である。

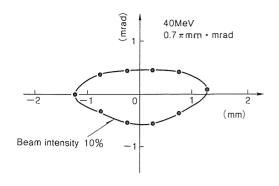


図3. エミッタンス⁽⁴⁾

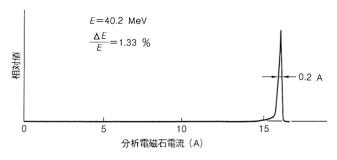


図4. エネルギースペクトル

7. む す び

以上のように技術の蓄積によって、放射光装置用ライナックの設計技術は一応のレベルに達した。

大型放射光用ライナックの1期分を担当することになり、 現在製作中である。2期分の担当の機会が与えられた場合は、 前述のブレークスルーポイントをクリアして満足していただ けるライナックとしたい。

参考文献

- (1) 戸田哲雄,立川清兵衛,根本幸昭,正田茂雄:東北大学 納めML-300電子リニアック用マイクロ波装置,三菱電 機技報,42,No.2,297~305 (1968)
- (2) 阿部久康, 池田和郎, 上富 勇, 山本吉彦:東北大学 納めML-300電子リニアック用大電力パルサ, 三菱電 機技報, **42**, No. 2, 306~311 (1968)
- (3) Hosokawa, T·, Kitayama, T., Ido, S., Uno, Y., Shibayama, A., Nakata, J., Nishimura, K., Nakajima, M.: Injector LINAC for Super-ALIS, Proc. of the 1989 IEE E Particle Accelerator Conf. (1989-3)
- (4) Shiota, M., Hiraki, A., Mizota, M., Iida, T., Haraguchi, M., Kuno, K., Nakamura, S., Ohon, M., Tomimasu, T: Design and Performance of the 40 MeV LINAC and Beam Transport System for the 1 GeV Synchrotron Radiation Source at SORTEC, Proc. of the 7th Symp, on Accelerator Science and Tech. (1989-12)

放射光装置用電磁石と電源

久野和雄* 松村 寧* 福本信太郎* 三田村政則* 寺本昭好*

1. まえがき

当社の放射光装置の製作実績で、2章(1)~(3)に示す3装置が、システムとして取組を行った代表的なものである。そのほかにも単体製作を含め、加速器の主要コンポーネントである電磁石及び電源については、当社神戸製作所が大半の製作を担当してきた。

本稿では、これらの各種電磁石及び電源について概説し、 各々の要素技術について説明を加える。

2. 電磁石及び電源の製作実績

(1) 分子科学研究所向け UVSOR 装置(1)

UVSOR 装置は、最大蓄積エネルギー 750MeV のシンクロトロン放射光装置であり、当社はシンクロトロン、蓄積リングの電磁石、電源の製作、据付け、アライメント及び挿入光源であるアンジュレータの製作を行った。図1に外観を示すシンクロトロン用偏向電磁石は積層型(後述)であり、けい素鋼板を扇形に積層する技術を新たに開発して完成させた。(2)(株)ソルテック向け1GeV 放射光装置(2)

(株)ソルテック向け1GeV 放射光装置は、当社がメーカーとして初めてプラント全体の受注、取りまとめを担当したもので、電磁石及び電源の製作については、蓄積リング及び低エネルギービーム輸送系を担当した。電磁石はすべてブロック型(後述)を採用し、高精度セオドライトを組み合わせた三次元測定システムを用いて、0.1mm以下の高精度で電磁石のアライメントを実施した。

(3) 日本原子力研究所向けJSR 装置 (3)

JSR 装置は、当社と他3社で共同建設したものであり、プ

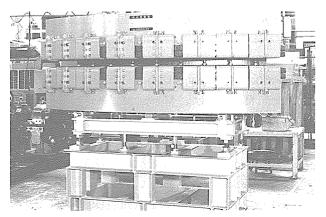


図1. 分子科学研究所向け UVSOR シンクロトロン偏向電磁石

ラントの取りまとめのほか,四極電磁石を除く偏向電磁石及びその他の電磁石,及び電源の製作,据付け,アライメントを担当した。

(4) 中央研究所向けシンクロトロン放射光装置用電磁石

当社中央研究所で進めているシンクロトロン放射光装置のシンクロトロン用電磁石のうち偏向電磁石は, UVSOR 装置で開発されたものと同様に,偏向角60°の扇形で積層方式を採用し,製作した。また,蓄積リング用には,超電導コイルを用いた偏向角180°の偏向電磁石が採用された。現在,基本設計を完了し,神戸製作所で製作を進めている。

(5) 高エネルギー物理学研究所向け衝突点用四極電磁石

高エネルギー物理学研究所のトリスタンリングの衝突点両側に設置されており、図2に外観を示すように、質量18t、ボア径 $140\,\mathrm{mm}$ 、鉄心長 $3\,\mathrm{m}$ の大型の高精度積層電磁石であり、2種類で計16台を製作した。

3. 電 磁 石

3.1 種類と機能⁽⁴⁾

加速器用電磁石は、発生する磁場の形状若しくはその機能により、一般に以下のように分類されている。

(1) 偏向電磁石

偏向電磁石は、機能から与えられた呼称であり、電子ビームの軌道方向に垂直な電磁石断面内(以下"断面内"という。)で、一様な強さを持った磁場を発生させる。

(2) 四極電磁石, 六極電磁石

四極電磁石や六極電磁石は、磁場の形状を得るために必要な磁極の数によって与えられた呼称であり、一般に n 極電磁石は、断面内で磁場の強さが零になる中心を持ち、中心から

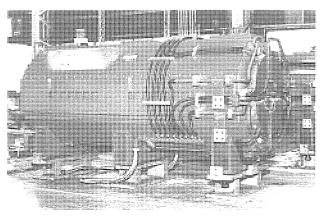


図2. 高エネルギー物理学研究所向け衝突点用四極電磁石

の距離の (n/2-1) 乗に比例して強くなる磁場を発生させる。

(3) ステアリング電磁石

ステアリング電磁石は、偏向電磁石の一種であり、その機能から与えられた呼称である。偏向電磁石や四極電磁石の不完全さから発生する電子ビームの軌道の変形を修正するために用いられ、補正電磁石とも呼ばれる。

(4) その他の電磁石

上記以外に, ビーム輸送系からリングへの電子ビームの入 射又は取り出し時のみに使用するセプタム電磁石, バンプ電 磁石及びキッカ電磁石等がある。

3.2 要素技術

鉄心と常電導コイルを用いた鉄心型電磁石が、加速器用電磁石として一般的である。これらは、励磁の方法により、磁路を形成する鉄心の製作方法や使用する磁性体の選択が異なり、導体の冷却方式によって使用する導体が異なる。これらを総合して設計を進めなければならない。

3.2.1 設 計

加速器用電磁石本体の設計は、基本的な磁場仕様、例えば磁場強度や有効磁場領域寸法等のビーム軌道計算の結果をもとに行われる。この結果、得られる励磁電流値、電圧値等のパラメータが、次に電源における設計条件となる。ただし、これらのパラメータは唯一に求められず、電磁石本体と電源及び給電ケーブルの敷設を含めて、システムのコストを最小化、最適化する必要がある。この最適化の手順は、煩雑であるため、プログラム化して基本仕様の決定までを自動化している。

さらに、最終的な磁極の詳細形状の決定については、汎用の磁場解析プログラムを用いて行っている。設計に用いられるプログラムとしては、磁極形状を二次元でのみ取り扱える

TRIM, POISSON, JMAG2D等と三次元で取り扱えるTOSCA, JMAG3D等があるが、精度や計算時間等の面からは、POISSON若しくはJMAG2Dが実用的である。図3はJMAG2Dを用いた偏向電磁石の磁場一様性の解析例であり、図4に示す実測値との比較では良く一致している。ただし、これらは二次元用であるので、磁極の長手方向の長さが磁極間げきの長さに比べて十分大きくとれない場合には、計算値と実測値とにずれが生じるため、過去の製作実績に基づく経験式によるか、製造台数が多い場合にはモデル電磁石を試作して、磁極形状を決定するのが一般的である。

3.2.2 鉄 心

シンクロトロン等で使用される交流電磁石 では、磁場を時間とともに連続的に変化させ、 その途中の磁場を利用する。この場合、励磁の途中で誘導電圧によって鉄心材に渦電流が生じ、磁場の追従性が損なわれる。この渦電流を流れにくくするため、鉄心は表面を絶縁した薄いけい素鋼板を断面形状に打ち抜き、積層して製作する。これを積層型鉄心と呼んでいる。特に、交流電磁石の中でも、数十μsより更に速い磁場の応答が要求される場合には、一般に、フェライトを磁性材に使用するが、飽和磁束密度が低いため磁場強度を高くとれず、解決策にアモルファス金属等の新素材の適用を検討している。

一方、蓄積リング等で使用される直流電磁石では、ある一定の磁場強度で利用できればよい。これらの電磁石には長時間の安定性が要求されるため、一般に鉄心は磁気余効が小さく、特性のばらつきが小さくなるように、炭素含有量が少なく、不純物の成分量がよく調整された鉄材の厚板から削り出して製作する。これをブロック型鉄心と呼んでいる。ただし、磁極の加工に高精度が要求される場合は、量産効果の得やすい積層型鉄心の方が製作コストは安価である。現在製作が進められている大型放射光施設向け蓄積リング用電磁石等は、

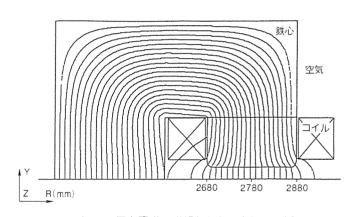


図3. 偏向電磁石磁場解析結果(磁束分布)

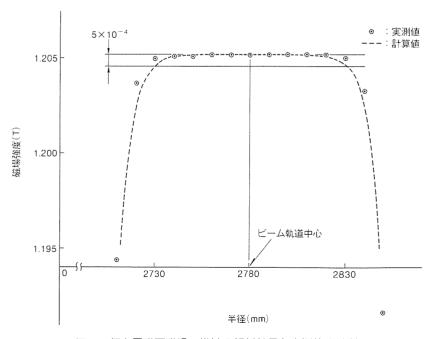


図4. 偏向電磁石磁場一様性の解析結果と実測値の比較

同一仕様で50~200台が製作されるため、直流電磁石であるが積層型鉄心が採用されている。このように積層型鉄心の製作技術は、高精度電磁石の製作上の重要技術であり、大型回転機の製作経験で蓄積された技術をもとに、高精度の鋼板の打ち抜き技術や積層技術の開発を行い、図5に示すような扇形偏向電磁石鉄心等の高度な積層型鉄心の製作技術を確立し、製品を製作・納入している。

3.2.3 コ イ ル

コイルは,ジュール発熱を表面からの熱放散で冷却する空 冷方式と冷却水を用いる水冷方式とに大別できる。

空冷方式は、運転維持が簡便であるが、導体の電流密度を 大きくとることができず、コイル形状が大きくなる欠点があ る。一方、水冷方式には、冷却管穴をもつ中空導体(ホロー コンダクタ)を用いる直接方式と冷却管の取り付けられた冷 却板をコイル中に挟み込むこと等によって冷却する間接方式 がある。空冷方式と比較すると、保守上の問題はあるが、導 体の電流密度を10倍近く高くとることができ、設計上の裕 度が大きい。

これらのコイルの巻線及び絶縁作業は、電磁石製作における工作時間の多くを占める重要技術の一つであり、これまでの製作経験をもとに、製作合理化のための巻線の自動化を進めている。

4. 電 源

電磁石電源は電磁石と同様, その役割によって分類でき, システム用途によってシンクロトロン用及び蓄積リング用に 大別できる。

4.1 シンクロトロン用交流電磁石電源

4.1.1 種類と概要

シンクロトロン用電磁石電源としては、偏向電磁石電源、 四極電磁石電源、六極電磁石電源等が代表的である。

これらの電源を、フラットベース及びフラットトップを持つ 2 Hz 繰り返しのブースタ モードで運転した場合の出力電流・出力電圧波形例を図 6 に、また、このときの仕様例を表 1 に示す。

ブースタ モード運転とは、ライナックから入射された電子ビームを所定のエネルギーまで加速し、次段の蓄積リングへ出射する繰り返し連続運転モードのことである。この場合、図6に示すように、電源のフラットベース部で電子ビームの入射が行われ、二次曲線で近似される30msの遷移期間を経てフラットトップに達し、ここで蓄積リングへの出射が行われる。以後は、前記と対称の電流波形でフラットベースに戻って、次の入射に備

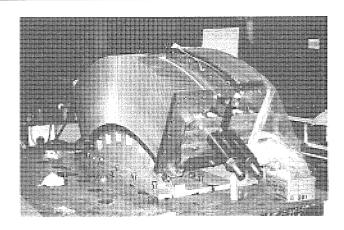


図5. 扇形偏向電磁石の鉄心積層状況

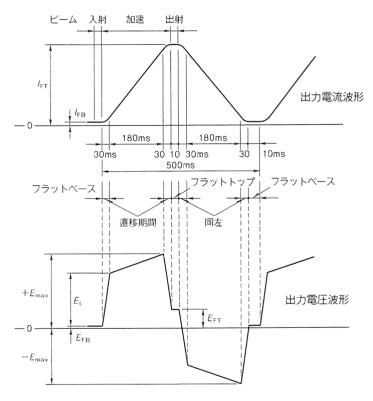


図6.シンクロトロン電磁石電源の出力波形例

表1.シンクロトロン電磁石電源の仕様例

		偏向電磁石電源	四極電磁石電源	六極電磁石電源
フラッ	, トベース電流 I _{FB} (A)	25.03	16.0	16.25
フラッ	, トトップ電流 I _{FT} (A)	1,312.5	805	812.5
フラッ	, トベース電圧 E _{FB} (V)	3.8	2.7	0.6
フラッ	,トトップ電圧 E _{FT} (V)	201	134	31.0
フォー	- シング電圧 <i>E</i> _L (V)	1,285	150	9.0
立上に	プ時最大電圧 + E _{max} (V)	1,486	284	40.0
立下的	プ時最大電圧 - E _{max} (V)	-1,275	-143	-8.0
ZZ -#1" *	インダクタンス L _l (mH)	約217	約41.3	約2.6
負荷*	抵抗 R ₁ (m Ω)	約153	約167	約37.7
電流料	青度(電流比)	± 5 ×10 ⁻³	± 5 × 10 ⁻³	± 5 × 10 ⁻³

注 * 配線のインピーダンスを含む。

え、繰り返し運転を行うものである。

4.1.2 課題と対応する要素技術

シンクロトロン用電磁石電源は,一般の直流安定化電源と 比較して以下に述べる特異性を持っている。

(1) 高インダクタンス負荷のパルス運転

負荷である電磁石は高インダクタンスであり、これにパルス電流を通電するためには、インダクタンスの逆起電力 (\pm $L_1 \cdot di/dt$) に相当する電圧を電流の遷移期間中 (図 6 では $30 \, \mathrm{ms}$) に発生させる必要がある。

(2) フラットベースの微少電流 (I_{FB}) から,フラットトップ の大電流 (I_{FT}) までの連続電流制御

表 1 の例では、 $I_{FB}/I_{FT} = 1/50$ である。定格電流の 2 %から 100 %に至るまで所定の精度以内に連続制御する必要がある。

(3) 高電圧回路における精密かつ高速な電流検出

上記(1)で述べたように電源の出力は高電圧となるが,電流のモニタ,制御用信号として精密かつ高速な電流検出を行う必要がある。

次に上記特異性に対応すべく適用される要素技術を以下に述べる。

- (1) フォーシング サイリスタとレギュレータ サイリスタと のシリーズ接続及び電圧のフィード フォワード制御 (5) 負荷インダクタンスの逆起電力 (±L₁・di/dt) を分担するフォーシング サイリスタ変換器と負荷の抵抗ドロップ分を分担するレギュレータ サイリスタ変換器とをシリーズに接続し、電流偏差を極小に抑えるため、自己学習制御を用いた電圧フィード フォワード制御を行う。
- (2) 高速, 多重チョッパ又はトランジスタシリーズ レギュレータによる精密補正電流制御
- (3) 高速,高精度 DCCT による主回路電位から絶縁された 電流信号計測方式と、16 ビット A/D 変換器を用いた 高速かつ精密な電流モニタ回路及び電流制御系

4.1.3 製作例

偏向電磁石電源の製作例として、図7に主回路構成、図8に制御回路構成を示す。フォーシング電源として24相のサイリスタ変換器を用い、レギュレータ電源には12相のインバータ コンバータ動作を行うサイリスタ変換器を用いている。また、変換器の電圧リップル低減手段としては、L-Cパッシブフィルタとアクティブフィルタを設置し、電流補正制御には、トランジスタ ドロッパを適用している。

4.2 蓄積リング用直流安定化電源

4.2.1 種類と役割・構成

蓄積リングに用いられる電磁石電源は、高精度・高安定度 の直流電源である。

(1) 偏向電磁石 (Bending Magnet) 電源 (以下 "BM 電源" という。)

BM 電源の主要定格例を表 2 に示す。BM 電源は一般的に,出力電流数百~千数百 A,出力電圧数十~ 200 V 程度である。出力電流の安定度は,定格に対して \pm 1×10^{-4} 程度,また,リップル許容値も同様である。ただし,シンクロトロン用とは異なり,電流の立上げ時における追従性,精度は必要とされないが,負荷の電磁石のヒステリシス特性による磁場の設定誤差を避けるため,起動時には電流値基準信号をランプ状に増大させ,リンキングを 1 % 以内に抑えている。

(2) 四極電磁石 (Quadrupole Magnet) 電源 (以下 "QM 電源" という。)

QM 電源の主要定格例を表 2 に示す。QM 電源は,電磁石 1 台ごとの対応となる場合が多く,1 システムについて複数 種類の出力定格のものが必要となる。一般的に出力電流数百 A,出力電圧数十 V である。出力安定度は±5×10⁻⁴程度,リップル許容値も同程度であり,仕様は BM 電源より幾分ゆるやかである。

(3) その他、ステアリング電磁石等

その他の電磁石電源としては、ビームの軌道修正を行うステアリング電磁石電源、偏向電磁石を直列励磁した場合に電磁石間の励磁量の調整を行う補助電源がある。

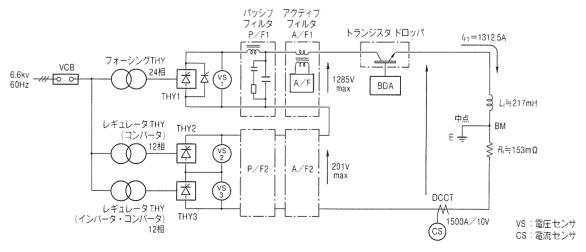


図7.シンクロトロン偏向電磁石電源の主回路構成

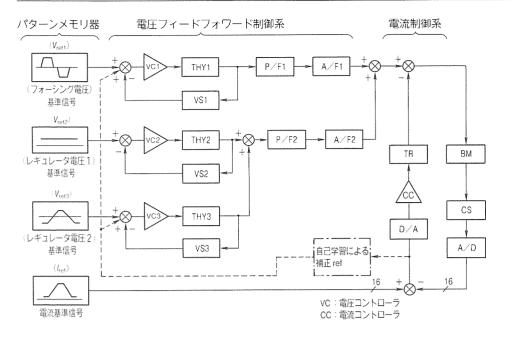


図8.シンクロトロン偏向電磁石電源の制御回路構成

表2. 蓄積リング直流電磁石電源の定格例

	BM 電源	QM 電源	ST 電源
定格電圧(V)	194	80	7.8
電 流(A)	1,400	400	25
安 定 度	± 1 × 10 ⁻⁴	$\pm 5 \times 10^{-4}$	$\pm 1 \times 10^{-3}$
リップル率	$\pm 1 \times 10^{-4}$	$\pm 5 \times 10^{-4}$	$\pm 1 \times 10^{-3}$

4.2.2 要素技術

蓄積リング用直流電源に関しては、電流を高安定度で出力するための技術が中心となる。

(1) 上位計算機のインタフェース

電磁石電源における上位計算機とのインタフェースはディ ジタル信号で行い,電流設定信号・操作指令信号・電流・電 圧モニタ信号・ステータス信号を伝送している。

電磁石電源の出力電流値制御はアナログ制御のため、電流 設定信号・電流・電圧モニタ信号の取り合いは、電源内部に 高精度のD/A、A/D を持ち、変換を行っている。

特にBM電源では、高精度を要求されるため、電流設定信号等は16ビットの信号を用い、タイミングずれ等によるグリッチを避けるため、ストローブ信号によって変換のタイミングをとっている。

(2) オーブン

蓄積リング用直流電源の電流制御で、安定度を左右する最大の要因は、制御系の温度ドリフトである。特に電流制御系は、温度ドリフトによって制御する電流の基準値がふらつくのを防止するため、オーブンを用いて電流制御系自体の温度を一定に保つようにコントロールしている。

(3) 計測

出力電流の安定度を確保する 上で重要な点は出力電流値の計 測である。

BM 電源、QM 電源では、温度係数の非常に小さい($5 \sim 10 \times 10^{-6}/\mathbb{C}$)ゼラニン、マンガン等の材質の電流値計測用シャントを用いている。また、このシャントを水冷化し、出力電圧値を大きく取るとともに、温度変化による影響を小さくし、電流制御特性を向上させている。

5. む す び

従来の加速器ビジネスにおける電磁石及び電源への取組は、 研究用大型加速器をターゲット

に、機器対応の受注製作が大半であった。しかしながら、近年、放射光装置は、半導体製造用リソグラフィ光源として脚光を浴び、産業利用への期待により、需要は民間へと拡大しつつある。今後は、機器単品からシステムの総合性能に対する要求にこたえられるように技術強化を図っていく必要があると考える。

参考文献

- (1) 渡辺 誠, 内田 章, 松戸 修, 酒井楠雄, 高見 清, 片山武司, 吉田勝英, 木原元央:入射用シンクロトロン の設計, UVSOR-7, 56~62 (1981)
- (2) Takanaka, M., Yamamoto, Y., Kijima, Y., Ohba, T., Tsutidate, H., Nakamura, S., Ohno, M., Awaji, N.: Construction and First Operation of the 1GeV Electron Storage Ring for the Synchrotron Radiation Source at SORTEC, Proc. of the 7 th Symposium on Accelerator Science and Technology, 16~19 (1989)
- (3) Harada, S., Ota, K.: A Compact Electron-Strage Ring for Use as a Synchrotron-Radiation Light Source for JAERI, ADVANCE, **48**, 33~34 (1989)
- (4) 加藤隆夫,神谷幸秀,熊谷教孝,山崎良成,平松成範, Cornacchia,M.:高エネルギー加速器入門,OHO'84, Ⅲ-1~Ⅲ-29 (1984)
- (5) Takanaka, M., Watanabe, S.: Design of the Circuit Parameters of the high Tracking Low-Noise Power Supply for the Bending Magnet of TARN II, INS-T-456 (1986)

放射光装置用超高真空技術と 高周波加速空洞技術

土舘裕幸* 飯田利昭*** 溝端正隆** 椋木 健**

1. まえがき

放射光装置(以下"SR装置"という。)の電子蓄積リングでは、加速された蓄積電子は残留ガスやイオン又はバンチ内の電子による散乱や、シンクロトロン放射によるエネルギー損失の量子的揺らぎ等により、軌道を外れ蓄積電流は減少する。ここでは、ビーム寿命に大きく影響を与える超高真空と、電子を集群させ、またシンクロトロン放射によるエネルギー損失を補う高周波加速空洞について述べる。

2. 超高真空技術

2.1 SR 装置と超高真空の必要性

SR 装置の真空性能は、

- (1) 装置の到達真空度
- (2) ビーム運転時の真空度

によって評価できる。特に(2)については、放射光照射によって発生する二次電子・イオン・中性ガスが蓄積電子ビームと相互作用するため、二次電子・イオン・中性ガスの発生量の低減及び発生物の除去が装置性能を左右する。

SR 装置の場合、ビーム寿命の観点からビーム運転時の平均真空度として10⁻¹⁰ Torr 台の真空が必要とされることが多い。また、放射光照射によって金属表面から脱離する主要ガス成分は水素及び一酸化炭素である。したがって、ビーム寿命を長くするためにはこれらのガス種に対して排気速度が大きいポンプを用意したり、ガス放出の少ない材料で真空ダクトを製作することにより、運転時の真空度を良くすること及び生成されるイオンを効率良く除去することが必要になる。SR 装置の製作に先立ち、以下の試作・開発を行った。

- (1) ガス放出率の測定による真空ダクト材質,表面処理方法の選定
- (2) 組込式スパッタイオンポンプの開発
- (3) 新型スパッタイオンポンプの検証
- (4) アルゴン放電洗浄法の評価試験
- (5) 磁極を考慮した偏向電磁石部真空容器ベーキングのため の熱設計及び検証
- (6) 実機大モデル真空容器試作及び真空試験

等を実施した。

以上の試作・開発により、次のことが明らかになった。

- (b) アルゴン放電洗浄は,条件設定が難しく十分な効果を確認できなかった。
- (c) 表面処理としては電解研磨, 化学研磨とも 250 $\mathbb C$ ベーキングで 10^{-12} Torr・L/s・cm² のガス放出率がえられた。
- (d) 偏向電磁石部真空ダクトは磁極と組み合わせた状態で 150 ℃ ベーキングが可能
- (e) NEG 付きイオンポンプの採用

さらに、実機の場合放射光照射時のガス脱離を減らすため、 溶存不純物の少ない真空再溶解ステンレス鋼を使用すること にした。

2.2 SR装置の真空排気系

加速器に使用される真空ダクトは通常断面積が小さく長い配管である。真空ダクト内の圧力分布は、ガス放出率・配管コンダクタンス ポンプ間距離に大きく依存し、真空ポンプの排気速度にはあまり依存しない。つまり平均真空度を良くするには、小型のポンプを多数配置する方がよいといえる。(株)ソルテック SR 装置の場合、真空ポンプとしてはスパッ

(株)ソルテックSR装置の場合、真空ポンプとしてはスパッタイオンポンプ、チタン サブリメーション ポンプを主ポンプにし、粗引きポンプにはターボ分子ポンプを使用した。表

表1. 真空機器リスト

	コンポーネント	数量	備考
1	スパッタイオンポンプ (NEG 付きスターセル型)	9	S=400L/s
2	分布型イオンポンプ (ダイオード型)	8	S=250L/s
3	チタン サブリメーション ポンプ	18	S=1,000L/s
4	チタン サブリメーション ポンプ	8	S=300L/s
5	スパッタイオンポンプ (ダイオード型)	1	S=500L/s
6	ターボ分子ポンプセット	4	S=180L/s
	7 400 1 40 7 C 9 F	2	S=170L/s
		7	円板型電極
7	イオン除去電極	8	帯状電極 偏向部真空ダクトに配置
8	電離真空計	10	
9	ピラニ真空計	10	
10	残留ガス分析計	3	
	が発展が不可付司	3	

注 S:排気速度

1に真空機器リストを、図1に真空排気系統を 示す。

2.3 SR 装置の真空ダクト

(㈱ソルテックSR装置の場合を例に説明する。 図2は、偏向電磁石部の真空ダクト、また図3 は直線部の真空ダクトを示す。電子ビームが周 回する部分の真空ダクトは真空再溶解をした オーステナイト ステンレス鋼製である。真空 ダクト内面は電解研磨仕上げをした。真空ダク ト表面にはシーズヒータをスポット止めし、 300℃まで単体ベーキングが可能である。

2.4 真空性能

(株)ソルテック SR 装置の各真空部品は単体で250℃48 h 真空ベーキングを工場で実施し、現地で一円組立てをした。蓄積リング組立後へリウムリーク試験を行い、第一回目の150℃48 h 真空ベーキングを実施した。結果を図4に示す。図で分かるようにベーキング時には10⁻⁷ Torr 台であり、比較的ベーキング温度が低いにもかかわらず10⁻¹² Torr に到達できている。原因としては、①真空ダクト表面処理、②真ななりは質。②ボンプ選定。④製作時の品

空ダクト材質, ③ポンプ選定, ④製作時の品質管理等が良かったためと考えられる。

2.1節で述べたように、SR 装置では放射光照射によるガス脱離が支配的になるため、いかに短時間でこのガス脱離率を低減するかがもう一つの課題である。このようなSR 装置の動的真空性能の測定結果を図5に示す。縦軸はビーム運転時の単位電流値当たりの真空度の変化であり、横軸はビームドーズ量(時間積算したビーム電流値)である。

図6はビームドーズ量18Ah, ビーム電流値200mAのときの偏向電磁石部真空ダクト及び直線部真空ダクトの残留ガス分析結果である。偏向部真空ダクトは直線部に比べ水素,一酸化炭素が多く、水が少ないのが分かる。

図7は電子ビーム軌道に捕そくされているイオンのビーム 寿命に与える影響を示したものである。

蓄積リングに設置された7個のイオン除去電極に-400Vの電圧を印加することにより、ビーム寿命が60%改善されることが分かる。

3. 高周波加速空洞技術

3.1 高周波加速空洞の役割

加速器は、電場によって荷電粒子を加速する。低エネルギー加速器では静電場による粒子の加速が多いが、高いエネルギーまで加速するためには、絶縁破壊等の問題から、交流電場を用いる。交流電場は半周期ごとにその方向が逆転するので、粒子を加速するためには、荷電粒子が通る時刻に電場が加速する方向を向いている必要がある。そのためには、交流

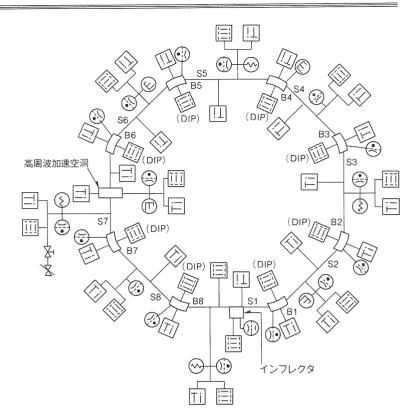


図1.(株)ソルテック真空機器系統

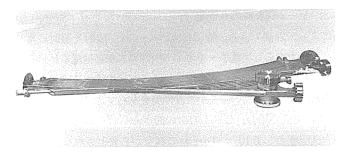


図2. 偏向電磁石部真空ダクト

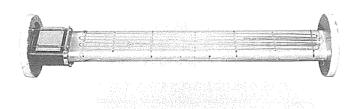


図3. 直線部真空ダクト

電場周波数が粒子周回周波数の整数倍でなければならない。 高周波加速空洞は,空洞内に高周波の交流電場を誘起し,荷 電粒子を加速,又はシンクロトロン放射で失われる荷電粒子 のエネルギーを補給するための装置である。

3.2 高周波加速系の構成⁽¹⁾

蓄積リング高周波加速系の系統を図8に示す。電源は、シンセサイザ、増幅管、サーキュレータなどから構成されている。シンセサイザからビームに同期した信号が発信され、増

幅管で増幅された後、必要な電力が同軸管から結合器 (パワーカップラ)を介して空洞に導入される。空洞にはその形状で決まる共振周波数があり、電源からの入力の周波数が空洞の共振周波数からずれていると、電力は反射され空洞内に電磁場はたたない。そこで空洞に設置されたチューナーを空洞内に出入させることにより、共振周波数を電源周波数に調整する。高周波加速システムの制御としてチューナーによる空洞の共振周波数制御のほか、加速電圧制御及びビームと同期をとるための電源位相制御を行っている。

3.3 高周波加速空洞の設計概要

周波数・加速電圧・必要電力などの空洞のパラメータについて、(株)ソルテック SR 装置の高周波加速空洞を例にとって述べる。

(1) 周波数

リングの周長は45.7 m であり、光速の電子の周回周波数は6.56 MHz となる。リングの運転周波数は、周回周波数の18 倍である118 MHz に設定している。

(2) 加速電圧

電子はリングを1周する間に、シンクロトロン放射によって平均32keVのエネルギーを失う。ビーム寿命を長くするためには放射損失を補う以上の大きな加速電圧をかけ、広い安定領域をとっておく必要があり、加速電圧 V_c は90kVに設定した。

(3) 電源容量

蓄積リングの場合は、放射光で失われるエネルギーを供給すればよいので入射電力 P_0 は次式で表される。

$$P_0 = P_W + P_r + P_b$$

$$P_{\rm W} = \frac{V_{\rm C}^2}{2 \cdot R_{\rm S}}$$

$$P_{\mathbf{b}} = U_0 \cdot I_{\mathbf{b}}$$

ここで、 $P_{\rm w}$:空洞での壁損失

Pr :空洞からの反射電力

P_b :ビームへの供給電力

 U_0 :放射損失

*I*_b : ビーム電流値

Rs :シャント抵抗

これから、ビーム電流値 $200\,\mathrm{mA}$ で必要電力は約 $10\,\mathrm{kW}$ となり、電源容量は余裕を見込み $14\,\mathrm{kW}$ とした。

以上, 高周波加速空洞の設計例として(株)ソルテックの蓄積リングのパラメータを**表2**に示す。

3.4 高周波加速空洞の構造

空洞の外観を図9に示す。

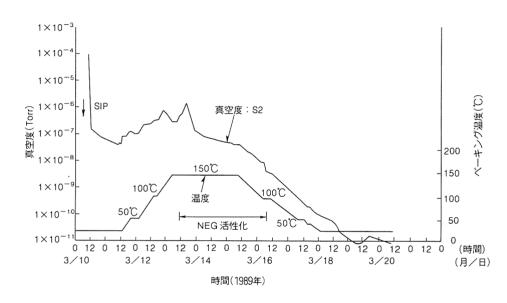


図4. 真空排気試験結果

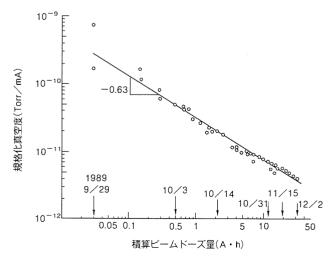


図5. 電流規格化真空度変化のビームドーズ量依存性

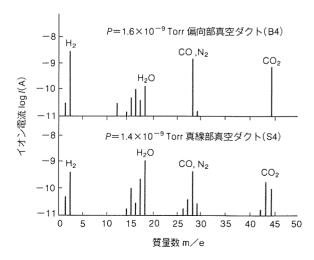


図6. 残留ガス分析結果

3.4.1 高周波加速空洞本体

空洞本体は容器部及び中心電極で構成されるが、これらに 使用される材料には以下の機能が要求される。

- ・空洞内表面に誘起される高周波電流によって電力損失が 生じる。この損失をできるだけ小さくするため、高い電 気伝導度をもつこと。
- 超高真空中で使用するため、放出ガス量が小さいこと。
- ・空洞外周面に真空機器,カップラ等の取付ポートを設けるため、ポートの接合が容易で信頼性の高いこと。

以上の目的を満足する材料として、容器部には無酸素銅ーステンレスクラッド鋼を、中心電極には無酸素銅を適用し、空洞の接合は電子ビーム溶接及び真空炉中ろう付けによって行った。空洞内面の表皮抵抗を小さくするため、また真空特性を良くするため、空洞内面は切削油を使用せずダイヤモンドバイトによる機械加工で仕上げている。空洞の分解の必要な部分は、金属Oリングによって電気的接合を得ている。

温度変化による周波数変化を小さくするため、±0.5℃

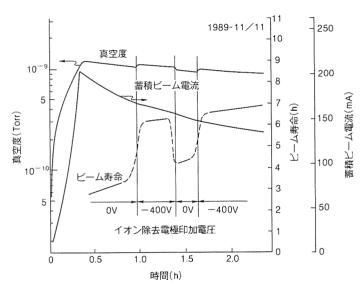


図7. イオン除去電極の効果

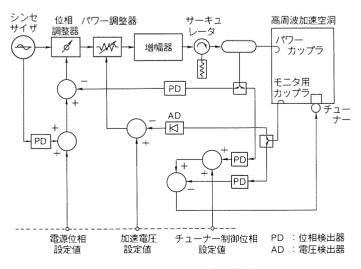


図8. 高周波加速系の系統

で温度制御をした純水で空洞本体を冷却している。

3.4.2 チューナー

空洞の共振周波数の調整に、手動チューナー、自動チューナーが各1台設けられている。手動チューナーは空洞の工作誤差の初期補正、自動チューナーはビーム負荷、空洞の熱変形等による周波数変動の自動補正に使用される。

手動チューナー, 自動チューナー共に電極部は無酸素銅製で水冷構造となっている。また, 電極部と空洞容器との空げきには高純度カーボンによる RF コンタクトを設けることにより, 高周波電流によるベローズ等の局部加熱を防止している。

3.4.3 カップラ

空洞へ高周波電力を供給するためのパワーカップラと空洞 内に誘起される高周波電磁界のモニタ用のカップラを設置し ている。

パワーカップラについてはアンテナループで空洞内磁界と結合する方式をとり、外周に水冷構造を持たせている。また、高周波電力は同軸管から供給される。パワーカップラと空洞の結合係数 β はアンテナループの回転による実効面積の変化により調整した。

3.5 ビーム試験⁽²⁾

加速周波数と同期していない電子はシンクロナス位相の周りで振動し、そのシンクロトロン振動数は加速電圧の関数として表される。ビーム蓄積状態で、シンクロトロン振動数から加速電圧を算出し、ビーム電流と入射、反射電力の関係を

表 2. 高周波加速空洞の設計値

ビームエネルギー	E (GeV)	1
ビーム電流値	$I_{\rm b}~({ m mA})$	200
周波数	f _r (MHz)	118
加速電圧	$V_{\rm c}$ (kV)	90
放射損失	$U_{\rm o}$ (keV)	32
空洞形式		リエントラント型
空洞形状 セル長	(mm)	400
キャビティ半径	(mm)	400
ボア半径	(mm)	55
ギャップ間げき	(mm)	約 23
無負荷時の Q 値 計算値	Q_0	24,400
測定值		20,100
シャント抵抗 計算値	$R_{\rm s}$ (M Ω)	2.0
シンクロトロン振動からの	O評価値	1.35
パワーカップラ型式		ループカップリング
パワーカップラ結合定数	β	1.77
チューナー周波数可変範囲	(kHz)	500
空洞冷却水量	(L∕min)	50
温度制御精度	(\mathcal{L})	45±0.5
 イオンポンプ	(L/s)	400 1台
チタンゲッタポンプ	(L/s)	1,000 2台
粗引用ターボ分子ポンプ	(L/s)	170 1台
高周波電源容量	(kW)	14

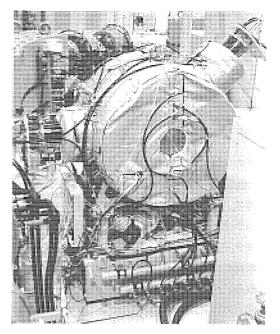
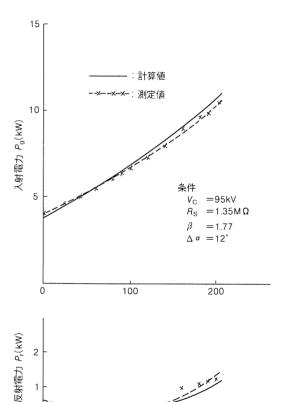


図9. 高周波加速空洞の外観



ビーム電流(mA) 図10. ビーム電流と入射, 反射電力の関係

100

調べた。結果を図10に示す。電力については計算値と測定値の良い一致を得た。

ロビンソン不安定性と言われるビームが空洞内に誘起する

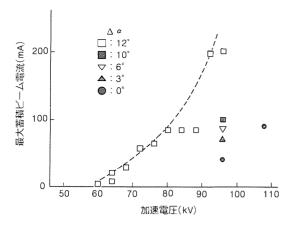


図11. 加速電圧と最大蓄積ビーム電流の関係

電磁場による不安定性を避けるため、実際のビーム運転では 共振周波数をはずして運転している。この制御はチューナー によって行われ、ビーム電流が増すとともに共振周波数を下 げるように動作する。図11 に加速電圧と最大蓄積ビーム電 流の関係を示す。 $\Delta \alpha$ はチューナー制御位相設定値(図 8 参 照)を示し、設定値ゼロで反射電力最小となる。破線は $\Delta \alpha$ が12°での蓄積ビーム電流上限値を示している。加速電圧90 kV で200 mA のビーム電流が蓄積可能であることを確認し た。

4. む す び

(㈱ソルテックSR装置の受注を機に進められた超高真空技術と高周波加速空洞技術の開発成果及び製品の仕様,ビーム試験結果を中心にまとめた。今後,装置の運転状況を参考にしてより完成度の高い製品を生産していきたいと考えている。

参考文献

- (1) Takanaka, M., Yamamoto, Y., Kijima, Y., Ohba, T., Tsuchidate, H., Nakamura, S., Ohno, M., Awaji, N., Tomimasu, T.: Construction and First Operation of the 1 GeV Electron Storage Ring for the Synchrotron Radiation Source at SORTEC, Paper contributed to the 7 th Symposium on Accelerator Science and Technology, 16~19 (1989)
- (2) Takanaka, M., Asai, O., Yamamoto, Y., Iida, T., Kijima, Y., Nakamura, S., Ohno, M., Awaji, N., Tomimasu, T.: First Operation of the 1 GeV Electron Storage Ring for the Synchrotron Radiation Source at SORTEC, Presented at the 2nd International Symposium on Advanced Nuclear Energy Research, 298 ~ 301 (1990)

200

円型加速器のラティス設計ツール

1. まえがき

円型加速器では、円形に配置した偏向電磁石で形成される 設計軌道上に粒子ビームを保持するために、四極電磁石や六 極電磁石などが用いられる。これらの電磁石を設計軌道に沿って配列したものは電磁石ラティスと呼ばれ、ラティス設計 は加速器の設計で重要な部分を占めている。

ラティスの設計では、①偏向電磁石と四極電磁石で構成される線形ラティスの設計と、②電磁石の色収差を制御するために導入される六極電磁石の副作用や電磁石の様々な誤差の影響評価とその対策の検討などが行われる。

これらの設計には計算機による数値計算が必要であり、これまでに多くの計算コードが開発されている。例えば、上記①の計算には $SYNCH^{(1)}$ や MAGIC などの汎用コードが用いられており、②に関しては PATRICIA や RACETRACK などの粒子トラッキングコードが開発されている。

上記の計算コードを小型加速器の設計に用いる場合,偏向電磁石の取扱いに問題のあることが知られている⁽²⁾⁽³⁾。すなわち,偏向電磁石を通過する粒子は軌道半径に反比例して強くなる非線形の作用を受けるが,これらの計算コードではこの作用が考慮されていないため,電磁石の色収差が正しく計算されないなどの問題が生じる。

今回,偏向電磁石の作用を正しく取り扱える計算コードを 開発した。この計算コードは,常電導電磁石を用いた加速器 について上記②の計算を行うものである。

ここでは、今回開発したラティス設計コードの説明と、このコードを用いた放射光発生用の小型電子蓄積リングの設計例について述べる。

2. ラティス設計の概要

円型加速器内の粒子は、電磁石の収束作用を受けて閉軌道の周りを振動(ベータトロン振動)しながら周回する。ラティス設計の主目的は、粒子が安定にベータトロン振動するための電磁石の配列を決定することである。ラティス設計では、主に以下の項目について検討が行われる。

(1) 偏向電磁石と四極電磁石で構成される線形ラティスについて、ベータトロン振動数と閉軌道に沿った振幅の変化を表す β 関数や運動量誤差をもつ粒子の閉軌道を表す η 関数などが計算される。以下では、 β 関数や η 関数をベータトロン関数と総称し、ベータトロン振動数をチューンと呼ぶ。

- (2) 粒子の運動量に誤差があるとき、電磁石の収束作用が変化する(色収差)ためチューンやベータトロン関数等も変化する。特に、単位運動量誤差あたりのチューンの変化はクロマティシティと呼ばれる。このステップでは、線形ラティスのクロマティシティ(ナチュラルクロマティシティ)の計算とその制御のための六極電磁石の磁場強度と設置場所の決定が行われる。
- (3) 電磁石に設置誤差や磁場誤差があるとき、閉軌道の変形 (COD) が起こる。このステップでは、電磁石の誤差を仮定したCODの計算とその補正のためのコレクタ電磁石の設置場所と磁場強度の決定が行われる。
- (4) クロマティシティ補正のために導入される六極電磁石や 曲率半径の小さな偏向電磁石には、ベータトロン振動が非線 形になることに伴う幾つかの副作用がある。その一例は、粒 子が安定に振動できる振幅に上限が現れることである。粒子 が線形振動を行っている場合、振幅の上限はビームダクトの 大きさで決まるが、非線形振動の場合にはこの動力学的な上 限(ダイナミックアパーチャ)も同時に考慮しなければなら ない。このステップでは、非線形ベータトロン振動に関連す る計算が行われる。
- (5) ビームの入・出射等のシミュレーションにより、設計されたラティスの総合的な性能評価や加速器の初期調整の方法の検討が行われる。

3. ラティス設計コードの説明

今回開発した設計コードは、**2章**の(2)~(5)の計算を行うものである。(1)の計算には SYNCH を使用しており、その出力結果の一部を入力データとして使用している。ここでは、この設計コードの主要部分である粒子トラッキングにおける偏向電磁石の取扱いについて述べる。

3.1 粒子トラッキングの方法

偏向電磁石内部の粒子の運動は次のハミルトニアンで記述 される。

$$H = H_0 + \frac{x}{2\rho} (P_x^2 + P_y^2) + \frac{1}{3} (1 - \Delta)$$

$$\left[(\frac{K}{\rho} + \frac{m}{2}) x^3 - \frac{3}{2} (\frac{K}{\rho} + m) x y^2 \right] \dots (1)$$

ここで、 H_o :線形振動を表す項 P_{y} , P_{y} :正準運動量

ρ : 軌道半径

△ : 粒子の運動量誤差

K. m:四極、六極磁場の強さ

式(1)のハミルトニアンから導かれる粒子の運動方程式を シンプレクティクに解くために正準積分法⁽⁴⁾を用いた。

偏向電磁石の出入口の漏えい磁場領域における粒子の運動 は正準化した二次の輸送行列⁽⁵⁾を用いて計算した。

3.2 粒子トラッキングの計算例

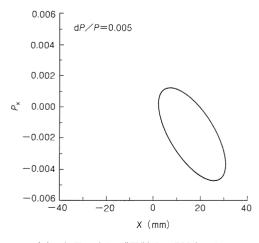
前節で述べた計算方法の正しさを確認するために、ロスアラモス陽子蓄積リングのラティス (軌道半径は4.1 m) についてトラッキング計算を行った。このラティスのナチュラルクロマティシティは偏向電磁石の作用が正確に取り扱える幾つかの計算コードにより計算されているため (3), その計算値を比較することで計算方法のチェックを行った。

まず、扇形偏向電磁石を用いたラティスについてクロマティシティと電磁石分割数の関係を計算した。その結果を表1に示す。分割数が10以上のとき、結果が収束していることが分かる(以下では分割数を10とする。)。文献(3)で報告されているクロマティシティの値は、水平方向が ξ_x =-1.076で垂直方向が ξ_y =-1.285であるので両者の結果がほぼ一致していることが分かる。

次に、電磁石のエッジ効果が正しく計算されていることを 確かめるために、く(矩)形偏向電磁石の場合についてクロ マティシティを計算した。表2にその結果を示した。この場 合も両者の一致は良いことが分かる。

表1. クロマティシティと電磁石分割数の関係

N	ξ _x	ξy
0	-2.048	-2.173
5	-1.120	-1.263
10	-1.093	-1.289
15	-1.093	-1.289



(a) トラッキング回数 0~500ターン

粒子トラッキングがリュウビルの定理を満たしていることを確かめるために、x 方向に振動している粒子の位相空間における軌跡をトラッキング回数を変えて計算した。矩形偏向電磁石の場合の結果を図1に示す。トラッキング回数を多くしても粒子の軌跡に変化がないことが分かる。

以上の結果から、今回開発した設計コードで行っているトラッキング計算の正しさを確認した。

4. ラティスの設計例

3章で述べた設計コードを用いて高輝度の小型放射光装置のラティス設計を行った。この装置は、周長が30.5 m で偏向電磁石部分の軌道半径が2.4 m の常電導電磁石を使用した1GeV 加速・蓄積兼用リングである。図2に装置の平面図を示した。

4.1 線形ラティスの設計

放射光装置では蓄積ビームの断面積と発散角が小さいことが望ましい。ビームの大きさと発散角の標準偏差はベータトロン関数 β 、 η とビームの運動量幅 $\sigma_{\Delta p/p}$ から次の式で計算される。

$$\sigma = \sqrt{\varepsilon \beta + (\eta \sigma_{\Delta_p \nearrow p})^2} \dots (2)$$

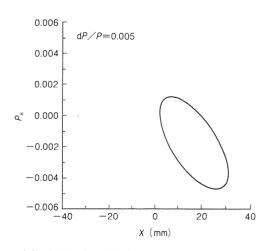
$$\sigma_{\rm o} = \sqrt{\varepsilon \, \gamma + (\, \eta' \, \sigma_{\varDelta \rm p/p})^{\, 2}} \, \dots \dots (3)$$

$$\gamma = \frac{1 + (\frac{1}{2}\beta')^2}{\beta} \dots (4)$$

ここで、 ε はエミッタンスと呼ばれるラティスに固有な定

表2. クロマティシティの比較(矩形偏向電磁石)

	今回の計算	文献(3)	SYNCH
ξx	-0.936	-0.928	-2.157
¢,	-2.102	-2.111	-1.738



(b) トラッキング回数9,500~10,000ターン

図1. 位相空間における粒子の軌跡

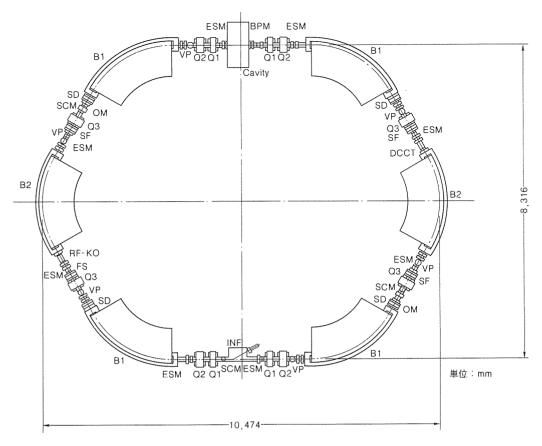


図2. 加速・蓄積兼用リングの平面図

数である。上の式から、ビームの断面積と発散角を同時に小さくするためには、エミッタンスを小さくしなければならないことが分かる。そのため、ラティスのタイプとして低エミッタンスのビームが得られる Triple Bend Achromat ラティスを採用した。ラティスの単位構造(セル構造)は3台の偏向電磁石と6台の四極電磁石からなり、二つのセルを連結してリングを構成している。

クロマティシティの制御には 2 種類の六極電磁石を 8 台使用する。六極電磁石の設置場所は,強い非線形磁場をラティスに導入することを避けるため,磁場強度がなるべく弱くなるように決定した。このとき,クロマティシティを 2 に補正するための磁場強度は $2.1\,\mathrm{m}^{-2}$ と $-2.5\,\mathrm{m}^{-2}$ である(以下の検討ではこの値を使用する。)。水平方向のチューンはビームを多回転入射するために 2.25 とし,垂直方向のチューンはベータトロン振動の共鳴現象を考慮して 1.22 に設定した。チューン設定の妥当性については 4.4 節で述べる。

図3に1セルのベータトロン関数を,**表3**にラティスの主要パラメータを示した。

4.2 電磁石誤差の種類と大きさ

現実のラティスでは電磁石の磁場誤差や設置誤差の発生が 避けられない。これらの誤差は電磁石の磁極幅が有限である ことなどから生じる系統誤差と,設置誤差などの設計段階で は不確定な統計誤差に分けられる。系統誤差は磁場計算等の 要素解析やR&D試作により予測することが可能である(要

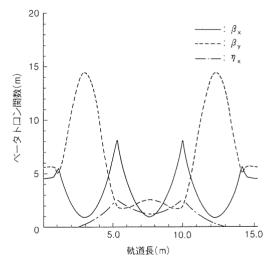


図3. ラティスのベータトロン関数

素解析に関してはこの特集号論文(6)を参照)。一方、統計誤差については稼働中の加速器の実績に基づいた誤差分布が仮定される。以下では、統計誤差のビームに対する影響について検討した。誤差の種類としては、磁場誤差及び電磁石の入口におけるx,y,z軸方向の変位と回転誤差を考慮した。表4に計算で仮定した誤差分布(標準偏差の2倍で切断したガウス分布)の標準偏差を示した。

4.3 閉軌道誤差の補正

電磁石誤差の値が異なる20ケースのリングに対して、閉

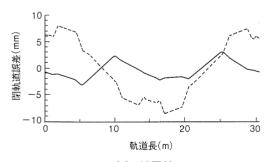
表3. リングの主要パラメータ

入射エネルギー(GeV)	0.1
蓄積エネルギー(GeV)	1.0
蓄積電流(mA)	300
ナチュラル エミッタンス(m・rad)	2.4×10^{-7}
エネルギー幅	7.3×10^{-4}
周 長(m)	30.4875
加速周波数(MHz)	118.0
スーパーピリオド数	2
偏向磁束密度(T)	1.4
曲率半径(m)	2.3826
ベータトロンチューン	
水平方向	2.25
垂直方向	1.22
ナチュラル クロマティシティ	
水平方向	-2.24
垂直方向	-2.51
モーメンタム コンパクション	0.156
ダンピングタイム	
水平方向(ms)	2.98
垂直方向(ms)	5.48
縦 方 向(ms)	4.71

注 パラメータは1GeV 時の値

表4. 電磁石の統計誤差

	偏向電磁石	四極電磁石	六極電磁石
dX (mm)	0.2	0.2	0.5
dY(mm)	0.2	0.2	0.5
dZ(mm)	0.5	0.5	0.5
$\theta_{\rm X}({\rm mrad})$	0.1	0.5	_
$\theta_{\rm Y}({\rm mrad})$	0.1	0.5	_
$\theta_{Z}(mrad)$	0.1	0.5	0.5
磁場強度	5×10 ⁻⁴	1×10 ⁻³	1×10 ⁻²



(b) 補正後 図4. 閉軌道誤差の例

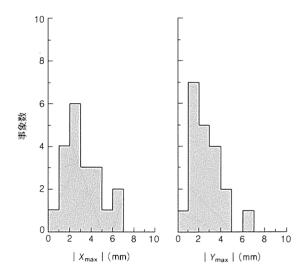
軌道誤差の計算とコレクタ電磁石を用いた COD 補正の検討を行った。

図4(a)に最も大きいCODが発生したケースの閉軌道を示す。ビームダクトの水平方向と垂直方向の大きさはそれぞれ ±55 mm と±18 mm を予定しているので、このケースでも 粒子がビームダクトで失われることはない。COD 補正はベストコレクタ法⁽⁷⁾ で行った。補正には、8台のコレクタ電 磁石と偏向電磁石及び8台のビーム位置モニタ(位置分解能を 0.2 mm と仮定)を用いた。図4(b)に補正後の閉軌道を示した。

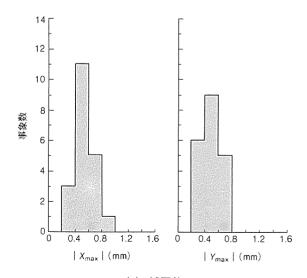
補正前後のモニタの場所での閉軌道誤差の最大値を全ケースについて求めた結果を図5に示す。この結果から、COD補正がすべてのケースについて有効に機能していることが分かる。

4.4 チューンの決定

リングを周回する粒子は周期的に同じ電磁石から力を受けるが,この力が積算的に作用する場合ベータトロン振動の共



(a) 補正前



(b) 補正後

図5. 位置モニタの場所における閉軌道誤差の分布

鳴が起こり振動が不安定になる。共鳴が起こる必要条件はチューンダイアグラムで表すことができ、今回設計したラティスでは図6のようになる。図の直線は共鳴線と呼ばれ、チューンがこれらの共鳴線の近傍にある時ベータトロン振動の共鳴が起こる可能性があることを表している(実際にどの共鳴が起こるかは、共鳴を駆動する磁場成分の有無やベータトロン振動の振幅に依存する。)。

リングのチューンは共鳴の影響を受けない値に設定しなければならない。チューンを決定するため、ベータトロン振動が安定なチューンの範囲を粒子トラッキングによって調べた。振動の安定性は、COD 補正後の20ケースのリングについて、粒子がビームダクトに衝突せずに500ターン周回できるか否かで判定した。図7に振動が安定であった事象数とチューンの関係を示す。この結果から4.1節で述べたチューンの設定が妥当であることが分かる。

4.5 非線形ベータトロン振動の影響

六極電磁石と偏向電磁石の粒子に対する非線形作用を粒子

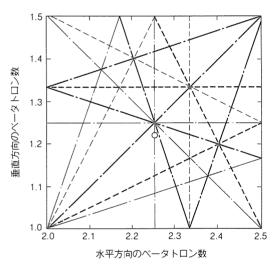


図6. ラティスの動作点(白丸)と四次までの共鳴線

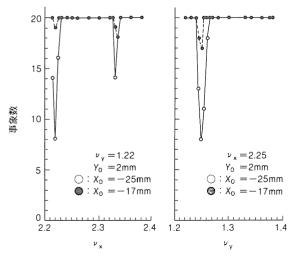


図7.チューンと共鳴の関係

トラッキングによって調べた。

図8にリングに電磁石誤差がある場合のダイナミックアパーチャを示す。図には、5ケースのリングに対して粒子が5,000ターンする間にその座標が±50cmを越えない粒子の初期座標を示した。ダイナミックアパーチャがビームダクトに比べて十分大きいことが分かる。

入射時における粒子の x 方向の振幅はビームの多回転入射によって最大で 25 mm 程度になるが、高効率のビーム入射を行うためには、ベータトロン振動はこの範囲で線形振動に近いことが望ましい。ベータトロン振動の線形振動からのずれを調べるために、粒子の位相空間における軌跡とチューンの振幅依存性を計算した。図9に x 方向の位相空間構造を、図10にチューンの振幅依存性を示した(線形振動では、位相空間における軌跡は振幅によらずだ円形であり、チューンは振幅に依存しない。)。ビーム入射に必要な振幅の範囲でx 方向のベータトロン振動が線形振動に近いことが分かる。

クロマティシティを 2 に補正した場合のチューンの運動量

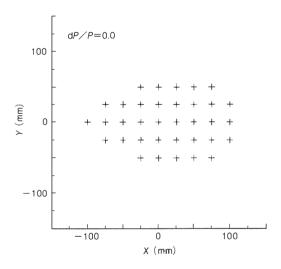


図8. 電磁石誤差を含むラティスのダイナミックアパチャー

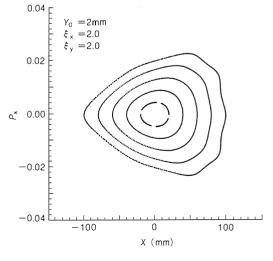


図9.x方向の位相空間構造

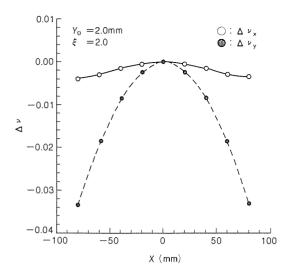


図10. チューンの振幅依存性

依存性を図11に示した。クロマティシティの非線形性が強くないことが分かる。

5. む す び

曲率半径の小さな偏向電磁石の粒子に対する作用が正しく 取り扱えるラティス設計コードを開発し、その使用例として 小型放射光装置のラティス設計を行った。このコードの開発 により、広範囲な大きさの円型加速器の設計が効率的に行え るようになった。今後、この設計コードを小型放射光装置な どに更に適用してラティス設計の合理化に努める。

参考文献

- (1) Garren, A., Chiba, K.: SYNCH, INS-T-459 (1986)
- (2) Jäger, J., Möhl, D.: Comparison of Methods to Evaluate the Chromaticity in LEAR, PS/DL/LEAR/Note 81-7 (1981)
- (3) Nishimura, H., Forest, E.: Comments on the Natural

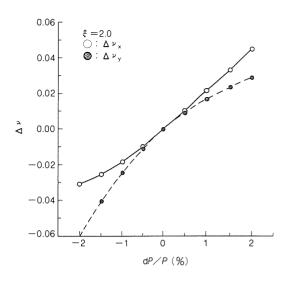


図11. チューンの運動量依存性

Chromaticity of a Small Circular Accelerator, Unpublished (Talk given at Japan Atomic Energy Reserch Institute) (1990)

- (4) Ruth, R. D.: A Canonical Integration Technique, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-30, No. 4 (1983)
- (5) Douglas, D., Forest, E., Servranckx, R. V.: A Method to Render Second Order Beam Optics Programs Symplectic, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-32, No. 5 (1985) Brown, K. L.: A First-and Second-order Matrix Theory for the Design of Beam Transport Systems and Charged Particle Spectrometers, SLAC-75 (1972)
- (6) 奥田荘一郎,中田修平,田中博文,山本俊二,板垣秀信,池上和律:電磁界解析とビームシミュレーション,三菱電機技報,65, No. 11, 1106~1110 (1991)
- (7) 福間 均: 閉軌道の補正, 高エネルギー加速器セミナー OHO'88 (1988)

電磁界解析とビーム シミュレーション

奥田荘一郎*山本俊二*中田修平*板垣秀信*田中博文**池上和律*

1. まえがき

シンクロトロン放射光装置(以下"SR装置"という。)では電子ビームの運動を電磁界で制御するので、その設計には電子ビームの運動のシミュレーション及び構成機器の電磁界解析が不可欠である。この論文ではこれら電磁界解析及びビーム シミュレーションの方法について論じ、具体的な適用例を紹介する。

電子ビームを所定の軌道に周回させるためには高精度の電磁界解析が必要である。電磁界解析には問題の種類に従って磁界解析,電界解析,渦電流解析及び高周波解析がある。この論文では、各々の分野の解析技術の現状を論じ、適用例として、四極電磁石の三次元磁界解析、真空チェンバの渦電流解析及び高周波加速空洞の三次元解析を紹介する。

SR 光の強度を高めるためには蓄積電流を増加する必要がある。蓄積電流を増加するとビームによる励起場 (wake field) が発生してビーム不安定性 (beam instability) が起こり,蓄積電流量が制限される。この課題については、従来から様々な取組が行われたにもかかわらず、まだ十分に解明されているとは言い難い。この論文では、筆者らの研究とその結果の一端を紹介する。

ビームが安定に周回するような磁界分布を求めるために、 ビーム シミュレーション (トラッキング) が必要である。超 電導電磁石を用いた SR 装置では偏向磁界の分布が複雑であ るため、従来の方法とは異なったビームトラッキング方法が 必要である。筆者らが開発したトラッキングプログラムとそ の解析結果について論じる。

2. 電磁界解析

電磁界は以下の Maxwell 方程式で記述される。

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \qquad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \qquad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \qquad (3)$$

$$\nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t}$$
(4)

この外に以下の物性関係式が用いられる。

$$D = \varepsilon E \qquad (5)$$

$$B = \mu H \qquad (6)$$

$$j = \sigma E \cdots (7)$$

電磁界は一般に三次元問題であるが、対象物が二次元及び 回転対称の場合には方程式の次元が下がって単純になる。汎 用プログラムの開発が盛んに行われた結果、これら二次元及 び回転対称問題は手軽に解けるようになっており、現在の電 磁界解析技術の開発努力は三次元問題に注がれている。

2.1 磁界解析

電界及び磁界に時間変化がない場合には電界と磁界に関する方程式は分離できる。このとき、磁界の基本方程式は

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \qquad (8)$$

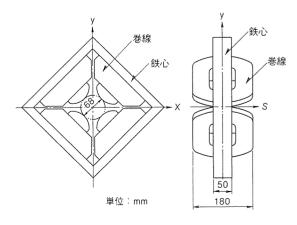
$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} \qquad (9)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \qquad (10)$$
である。

SR 装置には種々の電磁石が用いられている。電子ビームの軌道を0.1 mm の単位で制御するために、これらの電磁石の設計には高精度の磁界解析が要求される。

SR 装置を小型にするため、ビーム軸方向に電磁石を薄くしたいという要求がある。このような電磁石の解析には従来行われていた二次元近似は適用できず、三次元解析が必要である。このような電磁石の解析例として、図1に示す四極電磁石をとりあげる⁽¹⁾。この電磁石の場合、鉄心の厚さ50 mm がボア径68 mm より小さい。

この電磁石の磁界解析はツー スカラーポテンシャル法 $^{(2)}$ で行った。この方法では電流のない領域では一般スカラーポテンシャル ψ



(a) ビーム軸方向正面図

(b) 側面図

図1.四極電磁石形状

磁性体の磁化によるもの $H_{\rm m}$ とに分離することによって、変形スカラーポテンシャル ϕ を定義する。

$$H=H_s+H_m$$
 ······ (12)

 $\nabla \phi = H_{\rm m} \quad \cdots \qquad (13)$

この定式化によって、三次元問題を元数の少ないスカラー方程式に帰着し、またコイルを有限要素分割と独立に計算できる長所がある。この定式化の汎用プログラムとしてTOSCA (2)がある。

これによって端部の磁極形状を最適化した。製作した電磁石のビーム軸方向の四極磁界分布を図2に示す。測定値は計算値と良い一致を示している。

2.2 電界解析

電界を用いてビームを制御, 搖動ないしは計測することが できる。電界を用いた部品としてビーム入射用インフレクタ, ベータトロン振動数モニタ及びビーム位置モニタがある。

電界の場合には物性方程式(5)が線形であるので、境界要素法が有利である。汎用法としては表面電荷法があり、アルゴリズムの改良によって三次元解析がこれら実際の機器の設計に用いられるようになっている⁽³⁾。

2.3 渦電流解析

磁界の時間変動は考慮しなければならないが、導体中の変位電流は無視できる $(\partial D/\partial t = 0)$ 周波数領域を渦電流場と呼ぶ。

式(3)を満たすためにベクトルポテンシャル A が導入される。

$$\nabla \phi = -(\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}) \quad \dots \tag{15}$$

このポテンシャル (A, ϕ) を用いた方程式を有限要素法で解くのが現在のところ最も有効な解法である $^{(4)}$ 。筆者らは併用法による定式化 $^{(5)}$ によって境界要素法の長所も取り入れている。

ビームを加速するシンクロトロンでは磁界が時間的に変動するために導体に渦電流が発生し、ビームの運動に影響を与える。このため、シンクロトロンの真空チェンバ、電磁石の押さえ板などの設計には渦電流解析が必要になる。また、入出射機器のセプタム電磁石では渦電流を利用して磁界の均一度と漏えい磁界の遮へいを行っている。この論文ではそのうち、真空チェンバの設計の例を紹介する。

渦電流を防止するためには、電気抵抗を上げるため真空チェンバを薄くしたい。一方、チェンバは外側の大気圧に対して内側の真空を機械的に保護しなければならないので、板厚を薄くすることには限度がある。このため、渦電流によって生ずる誤差磁界の許容値を越えない最大の板厚を渦電流解析によって求める必要がある。

当社 SR 装置の入射用シンクロトロンの例を**図3**に示す (6)。外部磁界としては偏向電磁石の加速波形を与えている。真空チェンバの板厚に対する誤差磁界がビーム変動から決まる仕様0.1%を越えないという基準から、板厚を0.3 mm と 定めた。

2.4 高周波解析

渦電流問題よりも高い周波数では変位電流は無視できない。この場合は Maxwell 方程式の一般的な解法に戻る必要がある。前節で導入したポテンシャル (A, ϕ) を用いると,以下の波動方程式が得られる。

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\mu_0 \mathbf{j} \cdot \dots (16)$$

$$\nabla^2 \phi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \dots (17)$$

シンクロトロン及び SR 装置では、ビームの加速は高周波空洞で行われる。高周波空洞を設計するためには式(16)、(17) において、源のない場合 P=0、j=0 の高周波解析が必要である。高周波空洞はほぼ回転対称な形状であるので、加速ギャップ間隔や最大電界は二次元のプログラムを用いて計算される。二次元のプログラムには SUPERFISH などがあり、これを用いた設計例は別稿で論じている。

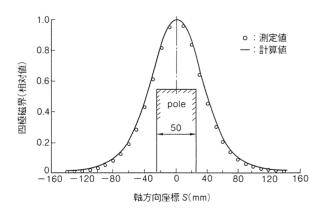


図2.四極磁界のビーム軸方向分布(測定値と計算値)

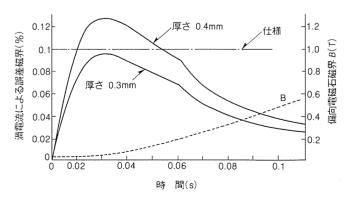


図3.シンクロトロンの偏向磁界で真空チェンバに 誘起される渦電流波形

実際の高周波空洞には位相角や結合係数を調整するためのプランジャ、カップラなどが付属しているので、形状は回転対称ではない。このため、TM₁₁₁ モードなど非回転対称な高調波成分が生じ、ビーム不安定性を引き起こす。従来の二次元プログラムでは解析が不可能で、三次元解析が必要である。当社では三次元汎用プログラム EMAS⁽⁷⁾ を用いて解析した。図4は出力例で、空洞内の電界強度の分布を示している。

3. ビーム シミュレーション

3.1 励起場解析

加速器中の電子が発する電磁界が真空容器で反射し、他の電子の運動に影響する。このような相互作用を引き起こす電磁界を励起場(wake field)と呼ぶ。励起場によってビームが広がったり、ビーム不安定性が発生するので、シンクロトロンや SR 装置の真空容器などの構成機器を設計する際には解析が必要である。

ビームが源 ρ, jになる波動方程式(16), (17)が基本方程式である。励起場に関してはこれまであまり研究が進んでおらず, 汎用の解析プログラムは回転対称モデルのものが若干ある程度である。軸からずれたビームや非対称な真空容器の励起場を解析するためには三次元解析が必要であるので, 筆者らは解析プログラム (8) を開発した。

対象としているのは一つの電子塊 (バンチ) の中の電子同士の相互作用である。解析方法としては、空間の離散化には有限要素法を用い、また時間の離散化には差分法を用いている。解析例を図5に示す。図の右から左へ走るビームが直方体の真空容器内に励起する電磁界を解析している。各時刻における容器内の電界の強さと方向を矢印で表している。

この励起場解析によってバンチ中の先頭部分の電子の励起場で後方の電子が不安定になる現象(head-tail instability)や多数の電子が加速空洞に入ることによって加速電界を乱す現象を解析することが可能になった。

3.2 ビーム不安定性解析

図4. 高周波空洞の三次元解析による電界強度分布

シンクロトロンや SR 装置の蓄積電流を制限する要因がビーム不安定性である。従来から種々の不安定性が発見されてきたが、予測可能なものは少なく、ほとんどが現在、研究が進行中の現象である。

一般にビーム不安定性は、ある条件が満たされる (域値を越える。) と起き、ある時定数 (成長時定数 growth time) を持って増大する。この不安定性を抑制する別の要因が成長時間よりも早く作用すれば収まるが、反作用が遅ければビームの性質が悪化 (エミッタンス、エネルギー分散などが増大)し、ついにはビーム損失に至る。

種々の不安定性について、それらの域値、成長時定数及び ビーム定数の変化を計算するプログラム ZAP⁽⁹⁾ が開発されている。リング定数などを入力すれば種々の不安定性に関する定数が手軽に得られる。しかしながら、真空チェンバのインピーダンスなどの入力定数には励起場解析を要し、また、結果を解釈するために、現象に関する理解を必要とする。

ビーム不安定性を解析した2例を紹介する。対象は、小型の硬X線用SR装置⁽¹⁰⁾である。図6はバンチ間の不安定性(coupled-bunch instability)に関する結果である。先に通過した電子塊(バンチ)の励起場によって後続のバンチが搖動され、域値を越えると不安定になる。搖動方向にはビームの進行方向(longitudinal)と横方向(transverse)とがある。これらの搖動はビームが放射光を発する度に減衰するので、各々の成長時定数がそれぞれ進行方向及び横方向の放射時定数よりも大きい間はこの不安定性は励起されない。図6にはビーム電流200mAのときのビームエネルギーに対するビーム進行方向及び横方向の不安定性成長時定数と放射減衰時定数を図示してある。対応する成長時定数と減衰時定数が等しくなるエネルギー以下ではバンチ間不安定性が生ずる。この域値エネルギーは進行方向で320MeVであり、横方向で400MeVである。

図7はバンチ内の空間電荷効果による不安定性 (intrabeam scattering) に関する結果である。バンチ内の電子相

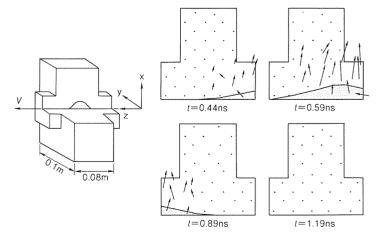


図5. 励起場の三次元解析例

互の電荷による反発力のためにバンチが広がる。ビームの進行方向への広がりによってエネルギー分散が、またビームの横方向への広がりによってエミッタンスが増大する。この効果はビーム電流が大きく、ビームエネルギーが低いほど顕著になる。図7にはビーム電流200mAの時のビームエネルギーに対するエミッタンスとエネルギー分散を図示してある。図中、点線は空間電荷効果を無視したときの値(自然値natural emittance, natural energy spread)である。400 MeV以下のビームエネルギーでは空間電荷効果のため、エミッタンスとエネルギー分散が自然値よりも顕著に増大している。

3.3 ビームトラッキング

ビームトラッキングとは、リング中の電子の運動をコンピュータ シミュレーションし、電磁石の配置や磁界分布の仕様を決める方法である。常電導の電磁石を用いた従来形のリングのビームトラッキングに関しては別稿で詳細に論じている。

近年開発が進んでいる小型 SR 装置では超電導電磁石を用

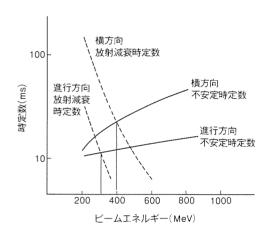


図6. バンチ間不安定性の解析例

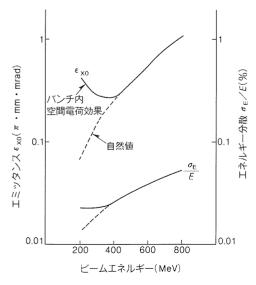


図7. バンチ内空間電荷効果の解析例

いる。実際の電磁石が発生する磁界には二極磁界だけでなく、 様々の多極磁界が含まれている。また、外部に磁界が漏えい し、内部の分布も均一ではない。このような偏向磁界でビー ムが回るか否かを判定しようとすると、ビームトラッキング が唯一の手段となる。

常電導リングを対象にした従来のビームトラッキング プログラムでは、ビーム進行方向に垂直な多極磁界しか考慮できなかった。超電導電磁石の多極磁界にはビームの進行方向に平行な成分が強く含まれるので、従来のプログラムを適用しても正確な結果は得られない。このため、筆者らは独自のプログラム PROVIDENCE (11) を開発した。

従来のプログラムでは、電子の軌道は中心軌道からのずれが小さいという仮定で近似的に求めていたが、このプログラムでは電子の運動方程式を直接積分することによって軌道を求める。また、偏向電磁石の磁界分布は磁界解析で求めた三次元分布をそのまま用いるので、正確なシミュレーションが可能である。計算量の増大に対処するため、ステップ幅を自動調整することによって、ミニスーパコンピュータで計算できる程度の計算時間に抑えた。

以下では、このプログラムを超電導小型蓄積リングに適用 した例を示す。図8は当社で製作中のSR装置の電磁石配置

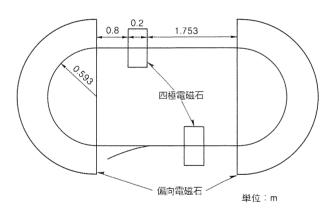


図8. 超電導 SR 装置の電磁石配置

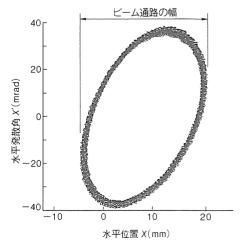


図9. ビームトラッキングをした結果の位相図

を示している。超電導の偏向電磁石と常電導の四極電磁石を 一対ずつ用いている。超電導電磁石の磁界分布はツー スカ ラーポテンシャル法を用いて数値解析した。

ビームトラッキングの結果を**図9**に示す。この図は、電子の周回軌道を求め、ある場所(この場合、偏向電磁石の中心点)における周回ごとの位置と発散角(中心軌道からの傾き)をプロットしたものである。これはポアンカレ マップといわれ、誤差磁界のないリングではだ円になることが知られている。

超電導SR装置の場合には超電導電磁石の誤差磁界のためにプロット点はだ円から離れ、太さを持った図形になる。この図形の横方向の幅がビームの通路の幅になる。誤差磁界が大きいほどこの幅が大きくなり、真空チェンバの幅を越えればビームはそこで消滅する。この図の場合にはビームの通路は真空チェンバよりも十分内側に納まっているので、偏向電磁石の磁界が妥当であることを確認できた。この結果に基づいて超電導偏向電磁石を製作中である。

4. む す び

SR 装置及びその入射用加速器の設計に必要な電磁界解析技術及びビーム シミュレーション技術に関して論じた。

電磁界解析は二次元解析が普通にできるようになっているが, 三次元モデルでなければ解析できない問題がある。これらの解析技術を実際の機器の設計に適用した例を, 磁界, 渦電流及び高周波問題について紹介した。

蓄積電流の増加を制限しているビーム不安定性の研究の現状を紹介し、その計算例を示した。また、不安定性を引き起こすビーム励起場を解析するプログラムについて論じた。超電導偏向電磁石を用いた小型 SR 装置を設計するために従来にないビームトラッキングが必要であること、また、プログラムを新規開発し、これを実際の装置に適用したことを論じた。

参考文献

(1) Yamamoto, S., Morita, M., Matsuda, T., Yamada, T.: Pole shaping for improving the deviation of the effective length in thin quadrupole magnets, in Proceed-

- ings of 11th International Conference on Magnet Technology (1989)
- (2) Simkin, J., Trowbridge, C.W.: On the Use of the Total Scalar Potential in the Numerical Solution of Field Problems in Electromagnetics, Int. J. for Num. Methods in Engineering, 14 (1979)
- (3) 奥田荘一郎, 中西寿夫:三次元電子レンズのシミュレーション, シミュレーション, **9**, 140~147 (1990)
- (4) 小貫 天:電気学会三次元動磁場解析調査専門委報告 (1991)
- (5) 中田修平,中川隆文:併用法による三次元渦電流解析, 第11回計算電気電子シンポジウム,シミュレーション 学会,162~164 (1990)
- (6) 丸山昭彦, 池上和律:SR 真空シンポジウム, 理化学研究所 (1991)
- (7) MacNeal, B. E., Brauer, J. R., Coppolino, R. N.: A General Finite Element Vector Potential Formulation of Electromagnetics Using a Time-integrated Scalar Potential, in Proceedings of INTERMAG '90, paper CD-06, Brighton, UK (1990)
- (8) Tsukishima, C., Nakata, S.: Wake Field Computation by Three-dimensional Finite Element Method, in Proceedings of International Symposium of Application of Electromagnetic Forces, Sendai, Japan (1991)
- (9) Zisman, B.S., Chattopadhyay, S., Bisgnano, J. J.: User's Guide for ZAP, Technical Report, Lawrence Berkeley Labs., LBL-21270 (1986)
- (10) Okuda, S., Nakanishi, T., Itoga, S., Nakata, S., Yamamoto, S., Yamada, T., Iwamoto, M.: Injection, Dynamic Aperture, and Beam Instability of a Small Synchrotron Radiation Source in the Hard-X-ray Region, Review of Scientific Instruments, 60(7), 1705 ~ 1708 (1989-7)
- (11) Tanaka, H., Nakanishi, H., Okuda, S.: Beam Tracking of a Small Storage Ring, in Proceedings of the 2nd Europian Particle Accelerator Conference, 1679 ~ 1681 (1990)

自由電子レーザの基本技術

佐藤信二* 築島千尋* 八十島義行** 奥田荘一郎** 中田修平**

1. まえがき

自由電子レーザ (Free Electron Laser: FEL) は、相対論的エネルギーをもつ電子ビームを周期磁場 (ウィグラー) 中に伝搬させ、電磁場との共鳴的な相互作用を引き起こすことにより、コヒーレントな電磁波の発生すなわちレーザ発振を起こさせるものである。自由電子レーザには電磁波を共振器内に閉じ込め電子と何度も相互作用させる発振型と、外部から電磁波を入力して電子ビームと一度だけ相互作用させる増幅型とがある。前者は電子蓄積リングやRFライナック、後者はインダクション ライナックが電子ビーム源として用いられる。

自由電子レーザの発振波長は電子ビームエネルギーとウィグラー磁場強度に依存するため、これらのパラメータを変化させることにより、広い範囲で容易に発振波長を制御できるという特長がある。また、電子ビームエネルギーが直接電磁波エネルギーに変換されるため高効率であり、レーザ媒質がないために絶縁破壊が起こらないので高いピークパワーが得られるという特長を併せ持つ。

自由電子レーザを実現するためには、高品質な電子ビームと高精度なウィグラー磁場が必要とされ、しかも、電子ビーム、ウィグラー及び共振器相互間の精密なアライメント技術が要求される。自由電子レーザの基本技術の確立を目的として、電子ビームと電磁場の挙動を解析するためのシミュレーションコードの開発と電子ビームやウィグラー磁場の計測制御及びアライメント技術の確立のための基礎的な実験を行っている。

この論文では、開発したシミュレーションコードの内容と 電子ビームパラメータ及びウィグラー磁場の計測技術につい て述べる。

2. 三次元シミュレーション コード

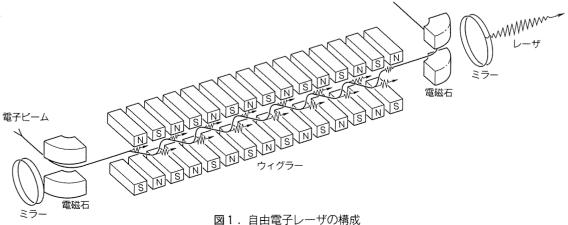
自由電子レーザは、一般的に図1に示すように電子ビーム、ウィグラー、共振器(ミラーで構成)からできている。相対論的エネルギーをもつ電子ビームをウィグラー中に伝搬させると電子は蛇行運動し、シンクロトロン放射による電磁波を発生する。その中のある波長をもつ電磁波は、電子ビームと共鳴的相互作用を引き起こしてレーザ発振に至る。その共鳴条件は式(1)で与えられる。

$$\lambda_{L} = \frac{\lambda_{W}}{2 \gamma^{2}} \left(1 + \frac{K^{2}}{2} \right) \quad \dots \tag{1}$$

$$K = \frac{qB_{\rm W} \lambda_{\rm W}}{2 \pi mc} \qquad (2)$$

 λ_L は電磁波の共鳴波長, λ_W はウィグラーピッチ, γ は電子ビームエネルギーと電子の静止エネルギーの比 (ローレンツファクター),K はウィグラーのK 値と呼ばれ,磁場強度 B_W とウィグラーピッチで与えられる。また,このK 値は電子速度の垂直成分と伝搬方向成分の比にローレンツファクターを掛けたものでもあり,電子ビームとウィグラーの相互作用の強さを表す。式(1)で表された共鳴条件の付近では電磁波の波長程度で電子ビームのミクロなバンチングが生ずる。電子ビームエネルギーが共鳴条件よりわずかに高い場合には,電磁波は電子ビームからエネルギーを受けるとともに,電子ビームのバンチング効果によって発生する電磁波はコヒーレントになりレーザ発振に至る。

このようなレーザ発振過程で、自由電子レーザの3要素である電子ビーム、ウィグラー、共振器の基本パラメータを評



価するために、ウィグラー中での電子ビーム及び電磁場の挙動を解析する必要がある。ここでは、自由電子レーザの基本動作を評価するためのウィグラー中での電子と電磁場との相互作用に重点をおいた非線形シミュレーション コードと磁場の不均一性やアライメントのずれ等の影響を調べるための線形シミュレーション コードについて説明する。

2.1 非線形シミュレーション

このシミュレーションは、自由電子レーザの詳細な動作を解析するためのもので、ウィグラー中での電子ビームの運動 方程式と電磁場の波動方程式を解く。電子と電磁場の相互作 用があるためシミュレーションに用いる基本方程式は非線形 となる。

2.1.1 電子の運動方程式とレーザ場の波動方程式

シミュレーションに用いたモデルと基本方程式の導出方法について述べる。自由電子レーザは、ウィグラー中での電子と電磁場の相互作用が動作原理であるから、詳細なシミュレーションを行うためには、電磁場中での電子の運動と電子の運動による電磁場の変化を記述しなければならない。電磁場中での電子個々の運動を記述するハミルトニアン及び電子の運動による電磁場の状態変化を表すマックスウェル方程式はそれぞれ式(3)、式(4)で与えられる。

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \frac{1}{\mathbf{c}^2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\mu_{0q} \sum_{i} \mathbf{v}_{i} \, \delta \left(\mathbf{r}_{i} \right) \quad \cdots \quad (4)$$

ここで、 P_i は電磁場中での電子の一般化運動量を表し、電子の運動量 p_i とは $P_i = p_i + q A$ の関係がある。また、 γ_i 、 v_i 、 r_i はそれぞれ各電子のローレンツファクター、速度及び位置を、 ϕ_{ij} はi 番目とj 番目の電子間のクーロンポテンシャルを、A はレーザとウィグラーのつくる電磁ポテンシャルを表す。

シミュレーションではモデルを簡単にするために次のよう な仮定を行った。

- (1) ウィグラーは平板型で磁場強度は一様な正弦変化をする。
- (2) レーザは単一波長でエルミートガウス型のモードを持つ。
- (3) 電子間のクーロン相互作用は無視する。

上記モデルではウィグラー ポテンシャル A_W とレーザポテンシャル A_L はそれぞれ式(5)、式(6)で与えられる。

$$A_{\mathrm{W}} = \mathbf{e}_{\mathrm{x}} \frac{mc}{q} K \left(1 + \frac{k_{\omega}^{2} y^{2}}{2} \right) \cos \left(k_{\omega} z \right) \cdots (5)$$

$$A_{\mathrm{L}} = \mathbf{e}_{\mathrm{x}} \frac{mc}{q} \sum_{lm} a_{lm} \left(t \right) g_{lm} \left(\mathbf{r} \right)$$

ここで、K, k_{ω} はウィグラーのK 値と波数, $k_{\rm L}$, $\omega_{\rm L}$ はレーザの波数と角振動数, $a_{\rm Im}$ はl-m モードにおけるレーザポテンシャルの振幅である。また、 $g_{\rm Im}$ と $\theta_{\rm Im}$ はl-m モードでの規格化されたエルミートガウス関数と位相シフトを示しそれぞれ式(7)、式(8)で表される。

$$g_{lm} = \left(\frac{2}{\pi l! m! (1 + \zeta^{2})}\right)^{1/2} H_{1}\left(\frac{2 \rho_{x}}{(1 + \zeta^{2})^{1/2}}\right)$$

$$\times H_{m}\left(\frac{2 \rho_{y}}{(1 + \zeta^{2})^{1/2}}\right) \exp\left(-\frac{\rho_{x}^{2} + \rho_{y}^{2}}{1 + \zeta^{2}}\right) \cdots (7)$$

$$\theta_{lm} = \frac{\rho_{x}^{2} + \rho_{y}^{2}}{1 + \zeta^{2}} \zeta + (l + m + 1) \arctan \zeta \cdots (8)$$

 $x = w_0 \rho_x$, $y = w_0 \rho_y$, $\zeta = (z - z_c) / z_R$ (9)

 $H_n(x)$, w_0 , z_R , z_c はそれぞれn 次のエルミート多項式, レーザビームのウェスト半径, レーリー長, ウェストのz 座標である。

微分方程式の解法を容易にするため、基礎方程式を一階微分方程式の形で表現した。マックスウェル方程式では、レーザ強度が電子ビームの伝搬につれて比較的緩やかな変化を行うものとして、時間及び空間に対する二次以上の微分項を無視した。一方、ハミルトン方程式はもともとが一階の微分方程式である。各変数ごとに書き下した方程式をレーザのウェスト w_0 とレーリー長 z_R で規格化を行うと以下の7個の基礎方程式が得られる。

$$\beta_{z} = 1 - \frac{1}{2 \gamma^{2}} \left[1 + \Gamma_{0x}^{2} + \Gamma_{0y}^{2} + K^{2} \cos^{2}(k_{\omega} \xi) - K \Gamma_{0x} \cos(k_{\omega} \xi) \right] \dots (10)$$

$$\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}\xi} = k_{\omega} + (1 - \frac{1}{\beta_{z}})k_{\mathrm{L}} \qquad (11)$$

$$\frac{\mathrm{d} \rho_{x}}{\mathrm{d} \xi} = \frac{z_{R}}{w_{0}} \frac{1}{\gamma \beta_{z}} [\Gamma_{0x} - K \cos(k_{\omega} \xi)] \cdot \cdots \cdot (12)$$

$$\frac{\mathrm{d}\,\rho_{\,\mathrm{x}}}{\mathrm{d}\,\xi} = \frac{z_{\mathrm{R}}}{w_{\,0}} \frac{1}{\gamma\,\beta_{\,\mathrm{z}}}\,\Gamma_{0\,\mathrm{y}} \, \cdots \qquad (13)$$

$$\frac{\mathrm{d}\Gamma_{y}}{\mathrm{d}\xi} = \frac{z_{\mathrm{R}}}{w_{0}} \frac{1}{\gamma \beta_{z}} K k_{\omega}^{2} \rho_{y} \cos(k_{\omega} \xi) \times [\Gamma_{0x} - K \cos(k_{\omega} \xi)] \dots (14)$$

$$\frac{\mathrm{d}\gamma}{\mathrm{d}\xi} = -\frac{1}{\gamma \beta_{z}} k_{\mathrm{L}} \left[\Gamma_{0x} - K \cos(k_{\omega} \xi) \right]$$

$$\times \sum_{lm} a_{\mathrm{lm}} g_{\mathrm{lm}} \sin(\varphi - k_{\omega} \xi + \theta_{\mathrm{lm}}) \quad \dots \dots \quad (15)$$

$$\frac{\mathrm{d}a_{\mathrm{lm}}}{\mathrm{d}\,\xi} = \mu_0 \frac{z_{\mathrm{R}}^2}{w_0^2} \frac{q^2}{m} \frac{N\,\sigma_{\mathrm{b}}}{nk_{\mathrm{L}}} \sum_{i} \frac{\beta_{\mathrm{x}}}{\beta_{\mathrm{z}}} a_{\mathrm{lm}} g_{\mathrm{lm}}$$

$$\times \sin\left(\varphi - k_{\mathrm{w}} \xi + \theta_{\mathrm{lm}}\right) \cdots (16)$$

以下に規格化条件を示す。

$$z=z_{\rm R}\xi=\beta_z ct$$
, $k_{\omega}z=k_{\omega}\xi$, $k_{\rm L}z=k_{\rm L}\xi$ (17)

$$\gamma_0 \beta_{0x} = \Gamma_{0x}, \gamma_0 \beta_{0y} = \Gamma_{0y}, P_y / mc = \Gamma_y \cdots (18)$$

シミュレーション コードでは、式(10)から式(16)までの7つの一階微分方程式をルンゲクッタジル法を用い電子の伝搬方向について遂次的に解き、ウィグラー中のすべての位置での電子ビームとレーザ場の振る舞いを計算する。式(10)から式(14)までは各電子の運動状態を、式(15)はウィグラー及びレーザとの相互作用による電子のエネルギー変化を、式(16)は電子の運動によるレーザ場の変化を表している。

2.1.2 数値的電磁ノイズと自発放射

上記シミュレーション コードのように電子の運動を追跡する方法では、計算機の計算速度や記憶容量の制限からすべての電子についての方程式を解くことはできないため、多くの電子の運動を代表する少数の超粒子を仮定してシミュレーションを行うことになる。ここでは、超粒子によるシミュレーションの妥当性と適用限界について考える。また、電磁場が小さい場合には、超粒子の発生する数値的電磁ノイズと電子の発生する自発放射場の違いが重要となるが、この領域でも適用可能なシミュレーションを行う手法について考察する。シミュレーションで実際に扱う方程式は式(3)、式(4)で表されるすべての電子のハミルトニアンとマックスウェル方程式ではなく、式(19)と式(20)で与えられる多数の電子を代表する超粒子のハミルトニアンとマックスウェル方程式である。

$$H_{i} = \gamma_{i} m_{\text{super}} c^{2} = \left[(\boldsymbol{P}_{\text{super},i} - q_{\text{super}} \boldsymbol{A})^{2} c^{2} \right]$$

$$+ m_{\text{super}}^{2} c^{4} c^{4} + q_{\text{super}} \sum_{j \neq i} \phi_{\text{super},ji} \cdots (19)$$

$$\nabla^{2} \boldsymbol{A} - \frac{1}{c^{2}} \frac{\partial^{2} \boldsymbol{A}}{\partial t^{2}} =$$

$$- \mu_{0} q_{\text{super}} \sum_{j \neq i} \boldsymbol{V}_{\text{super},i} \delta (\boldsymbol{f}_{\text{super},i}) \cdots (20)$$

超粒子一個がn個の電子を代表すると仮定すると,超粒子の電荷と質量はそれぞれ電子のn倍であり, $q_{\text{super}}=n\cdot q$, $m_{\text{super}}=n\cdot m$ の関係がある。また,質量がn倍であるから超粒子の正準運動量も電子の正準運動量のn倍となる。

$$P_{\text{super}} = p_{\text{super}} + q_{\text{super}} A = \gamma m_{\text{super}} v + q_{\text{super}} A$$

= $n (\gamma m v + q A) = n (p + q A) = n P \cdots (21)$

式(3)と式(4)の替わりに式(19)と式(20)を扱うことによってシミュレーション結果にどのような違いを生ずるかを考えてみる。電子の運動はハミルトニアンによって記述される。いま、扱う場のクーロン相互作用の寄与は小さいとして無視できるとする。この場合には式(3)及び式(19)とも右辺第二項は省略でき、超粒子のハミルトニアン(19)は電子のハミルトニアン(3)のスカラー倍(n倍)となる。ハミルトン方程式は式(22)、式(23)で与えられる。

$$\frac{\mathrm{d}\,\mathbf{Q}}{\mathrm{d}\,t} = \frac{\partial\,H}{\partial\,P} \tag{22}$$

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial H}{\partial Q} \tag{23}$$

ここで、**Q** と P は一般化座標と正準運動量である。上式からハミルトニアンと正準運動量が同一の定数倍で与えられるときには、運動方程式は不変となることが示される。すなわち、クーロン相互作用のない電磁場中での荷電粒子は電荷と質量の比が一定であれば同じ運動を行うことになり、超粒子のハミルトニアンを扱うことで電子の運動を模擬できる。

一方、マックスウェル方程式(4)と(20)の違いは、電磁場の発生源を表す右辺である。超粒子の電荷は電子のn倍であり、粒子数は電子の1/nであり、前述の考察から超粒子の運動は電子の運動を模擬することから式(24)はほぼ成立する。

$$q_{\mathrm{super}} \sum_{\mathrm{i=1}}^{N} \mathbf{v}_{\mathrm{super,i}} \, \delta \, (\mathbf{r}_{\mathrm{super,i}}) \approx q \sum_{\mathrm{i=1}}^{nN} \mathbf{v}_{\mathrm{i}} \, \delta \, (\mathbf{r}_{\mathrm{i}}) \, \cdots \cdots (24)$$

すなわち, 超粒子の運動による電磁場の変化は近似的に電子による電磁場の変化を模擬できることになる。

以上のことから多数の電子を少数の超粒子で代表させても 電子及び電磁場の運動を模擬できることが分かる。

しかし、式(24)の両辺のわずかな違いが問題となる場合が ある。それは、もともとの電磁場が極めて小さい場合である。 電磁場の初期値が0のときは、式(4)は電子の自発放射によ る電磁場の発生を、式(20)は超粒子による数値的電磁ノイズ の発生を表す。実際の電子数は非常に大きく電子の速度・位 置が様々な値をとるため、式(4)の右辺の寄与はほぼ0とな り、統計からのわずかなずれが自発放射場として観測される。 シミュレーションで超粒子の速度・位置を乱数で与えると、 粒子数が実際の電子数より圧倒的に小さいため電子の統計と は異なる。このため、超粒子の発生する数値的電磁ノイズは 自発放射場を表現できない。また、マックスウェルの方程式 から一粒子の発生する電磁ポテンシャルはその粒子の電荷に 比例することが示される。ふく(輻)射場はポテンシャルの 自乗で表される。したがって、1個の超粒子の発生する数値 的電磁ノイズは q_{super}^2 (= n^2q^2) に比例し、それに対応するn個の電子が発生する自発放射場はnq²に比例する。すなわち, 超粒子の代表する電子の個数が多ければ多いほど実際の電子 の統計から遠ざかるだけでなく、数値的電磁ノイズは自発放 射場からかけ離れた値を示すようになる。一般に、数値的電 磁ノイズがシミュレーション上で問題になるのは、自発放射 場がレーザ発振の原理である誘導放射場に比べて無視できな い程度に大きい場合である。したがって、レーザ発振の立ち 上がりや利得の小さいレーザのシミュレーションに対しては 信頼性を欠くことになる。

以上の数値的電磁ノイズの問題を除去するために、シミュレーション コードにクワイエットスタートと呼ばれる方法

を取り入れた。LaSala 等⁽¹⁾によって提案された方法で超粒子の初期値の与え方に関するものである。前述のように数値的電磁ノイズには初期値を乱数で与えたときに生ずる統計の問題がある。クワイエットスタートは、超粒子の発生する数値的電磁ノイズを互いに消去するように初期配位を決める方法である。この方法は、シミュレーションから自発放射過程を排除することになるためレーザ発振の立ち上がりは記述できないが、その他の過程に対しては超粒子の数値的電磁ノイズの影響を消去できるため信頼性の高いシミュレーションを行うことができる。

シミュレーションで扱う粒子の独立変数はエネルギー、伝 搬方向に垂直な運動量と空間座標の 6 次元である。空間座標 のうち伝搬方向の成分は、レーザ場との相互作用を扱うため レーザに対する位相 φ で表す。そして、これらの配位は、互 いに独立であるとすると粒子の分布 F は式(25) で与えられる。

$$F = F (\gamma, \varphi, x', x, y', y)$$

$$= F_{\gamma}(\gamma) F_{\varphi}(\varphi) F_{\varepsilon}(x', x, y', y) \cdots (25)$$

クワイエットスタートではレーザ位相に対して π /2ごと 又は π /4ごとに粒子を与える。位相以外の配位の分布は、 各位相で同一にする。例えば、式(26)のように与える。

$$F_{\varphi}(-\pi) F_{\gamma} F_{\varepsilon} = F_{\varphi}(-\frac{\pi}{2}) F_{\gamma} F_{\varepsilon}$$
$$= F_{\varphi}(0) F_{\gamma} F_{\varepsilon} = F_{\varphi}(\frac{\pi}{2}) F_{\gamma} F_{\varepsilon} \cdots (26)$$

レーザの波長はウィグラーピッチに比べて極めて小さい。したがって、レーザ波長程度の位置のずれではウィグラー磁場はほとんど変わらないと考えられる。このため、上記のような粒子配位では、各位相面における粒子は伝搬方向にレーザ位相の π/2 に対応する距離だけずれた同一の運動をすることになるため、各位相面から発生する数値的電磁ノイズは同一の振幅で互いに位相が π/2 だけずれたものになる。したがって、全体での数値的電磁ノイズは互いに消去し合うことになる。クワイエットスタートによる効果を乱数による初期値配分と比較した結果、前者ではある電磁エネルギー以下での利得は一定(小信号利得領域)となるが、後者では数値的電磁ノイズの影響で電磁エネルギーが小さくなるにつれ見かけ上の利得が大きくなり、小信号利得領域が現れない(2)(3)

クワイエットスタートでは、完全に数値的電磁ノイズを消去してしまうため自発放射及びレーザの立ち上がりが記述できない。しかし、粒子の各位相をπ/2ごとに固定するのではなく、わずかに分布をもたせることによって数値的電磁ノイズを故意に発生させ、それによって自発放射過程を記述することができる。すなわち、

$$F_{\varphi} (n = -2, -1, 0, 1)$$

= $F_{\varphi} (\frac{n \pi}{2} + \delta)$ (27)

として δ にわずかな分布を与える。電子ビームとウィグラー のパラメータから上記の位相差 δ を求める方法は現在検討中 である。

2.2 線形コードによる補正

実際のウィグラーのもつ磁場は完全には一様ではない。また,電子ビームもウィグラーの中心軸上を理想的に伝搬させることは困難である。したがって,実際の装置を設計する上ではこれらの理想的な状態からのずれによる影響を評価することも必要となる。しかし,前述の非線形コードではこれらの影響を含めたシミュレーションを行うためには膨大な計算時間と記憶容量を要する。そこで,磁場の不均一性,アライメントのずれのため利得がどの程度減少するかを評価するためメーディーの理論(4)を用いた線形シミュレーションコードを作成した。

メーディーの理論によれば、ウィグラー中における電子の エネルギー変化量と自発放射光スペクトルの関係が次式で与 えられる。

$$\langle \gamma_{\rm f} - \gamma_{\rm i} \rangle = \frac{1}{2} \frac{E_0^2}{(2 m c^2)^2}$$

$$\times \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d} \gamma_{\rm i}} \left| \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{\beta_{\perp}^0(z)}{\beta_{\parallel}^0(z)} e^{\mathrm{i}^{(\omega_{\rm t} - kz)}} \mathrm{d}z \right|^2 \cdots (28)$$

ここで γ_i と γ_i はウィグラーの入口と出口でのローレンツファクター, E_0 はウィグラー入口でのレーザの電場の強度である。

一方, ウィグラーを通過する間のレーザの利得は電子ビームの損失であるから利得は次式で表される。

$$G = \frac{mc^2 \mid \langle \gamma_f - \gamma_i \rangle \mid (I_p / q)}{\frac{1}{2} \epsilon E_0^2 c} \qquad (29)$$

式(28)の左辺は電子の速度のみが変数となっている。電子の運動はローレンツ力のみで規定されるため、ウィグラーの各点での速度は次式から求めることができる。

$$mc\frac{\mathrm{d}\left(\boldsymbol{\gamma}\boldsymbol{\beta}\right)}{\mathrm{d}t} = -q \cdot \left[\boldsymbol{E}_{\mathrm{L}} + \boldsymbol{\beta}_{\mathrm{c}} \times \left(\boldsymbol{B}_{\mathrm{L}} + \boldsymbol{B}_{\mathrm{W}}\right)\right] \cdot \cdot (30)$$

 B_{W} はウィグラー磁場を、 E_{L} と B_{L} はそれぞれレーザの電場と磁場を表す。

Bwに測定した値を用いることにより、式(30)から実際の不均一磁場中での電子速度が求まる。また、電子のウィグラーへの入射角や入射位置、電子ビームエネルギーを初期値として様々に与えることにより、アライメントのずれや電子ビームのサイズ、角度広がり、エネルギー分散を考慮した電

子速度を求めることができる。さらに、求めた電子速度を式(28)に代入して各電子のエネルギー損失を計算すれば式(29)を用いて理想的な場合からずれたときの利得を計算できる。

3. 自由電子レーザの基礎実験

遠赤外域のレーザ発振と計測・制御技術の確立のために、20 MeV RF ライナックと6 cm ピッチのウィグラーを用いた自由電子レーザシステムを設計した。システムの主なパラメータを表1に示す。パラメータについては後に詳しく述べる。ここでは、設計に先だって行った前述のシミュレーションコードによる動作解析と電子ビーム、ウィグラー磁場の計測・制御のために行った基礎実験について述べる。

3.1 装置のシミュレーション

図 2 から図 4 は、非線形コードによるシミュレーション結果、図 5 と図 6 は、線形コードでの測定磁場による不均一磁場下でのシミュレーション結果である。

図2はウィグラーの入口でのレーザパワーが1MW のときウィグラーを1回通過する間に得る利得を各レーザ波長について計算した結果である。最大利得を示す波長は37.1 μm であった。図3は,位相空間での電子ビームの運動を時間を追って表したものである。横軸はレーザの一波長分の位相を,縦軸は電子エネルギーである。上図ではクワイエットスタートにおける電子ビームの位相とエネルギー分布が示されている。時間の経過とともに電子ビームがレーザの一定の位相に

表1. ライナックとウィグラーのパラメータ

電子ライナック	エネルギー	20 MeV
	電流	100 mA
	パルス幅	3.0 µs
	エミッタンス	πmm·mrad
	エネルギー広がり	± 1 % (full)
ウィグラー	ピッチ	6 cm
	周 期	28
	全 長	1.68 m
	磁場強度	0.25 Т
	K 値	1.4

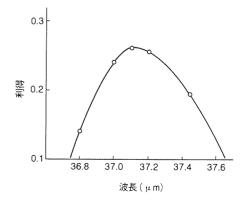
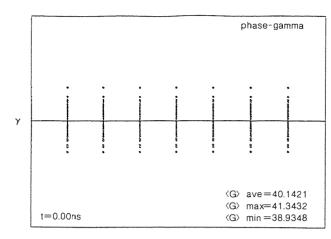
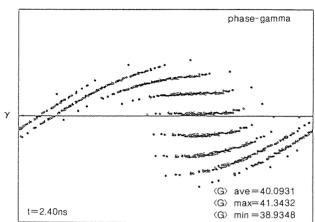


図2. レーザ波長と利得の関係





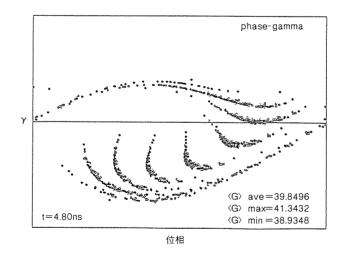


図3. 位相空間における電子ビームの運動

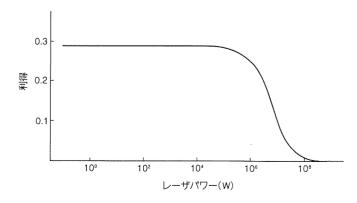


図4. レーザパワーと利得の関係

バンチングしていく過程が見られる。図4では、入力レーザパワーに対する利得の変化を表したものである。10kW以下では、利得が約30%で一定値となっている。これは、クワイエットスタートにより、数値的電磁ノイズの発生が抑えられていることを示している。また、10MW付近で飽和状態に至ることが分かる。

図5は、電子ビームのエミッタンスによる利得の変化を計算した結果である。エミッタンスが悪化するにつれて利得が下がるとともに最大利得を示すレーザ波長が長波長側にシフトしている。エミッタンスが1.14 mm・mrad のときには、エミッタンスが0のときに比べて72%の利得しか得られない。

図 6 は、電子ビームの入射位置や入射角度がウィグラーの中心軸からずれたときの利得の低下を表したものである。利得の低下を 90 %程度に抑えるためには、角度では $1.5\,\mu$ rad、位置では $0.5\,\mu$ m の精度でアライメントを行わなければならないことが示されている。

3.2 装置の計測制御

発振実験に先だって、電子ビーム、ウィグラー磁場の計測 ・制御、アライメント技術の確立のために以下のような実験 を行った。

電子加速器は、Sバンド RF ライナックである。性能は、エネルギー $20\,\mathrm{MeV}$ 、マクロパルス電流 $100\,\mathrm{mA}$ 、パルス幅 $3.0\,\mathrm{\mu s}$ である。四極電磁石とワイヤグリッドモニタによる 測定エミッタンスは、垂直方向で $1.04\,\mathrm{\pi\,mm\cdot mrad}$ 、水平 方向で $1.14\,\mathrm{\pi\,mm\cdot mrad}$ である。

また、ウィグラーは、住友特殊金属社製の永久磁石 NEO MAX-35 (残留磁場強度1.2T) を用いた線形ウィグラーである。ピッチ6cm、周期数28であり、ウィグラーのギャップ間隔を35mmにしたときの中心磁場強度は、0.25Tである。ホール素子による磁場測定を行い磁石ごとの強度を調整して誤差磁場を0.06%に抑えてある。

ライナックからウィグラーまでのビーム輸送系を図7に示

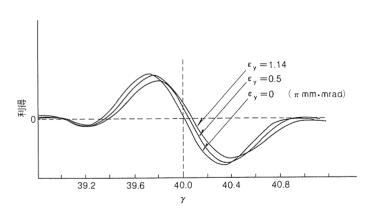


図5. エミッタンスと利得

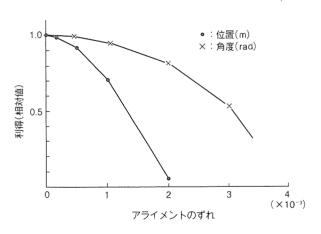


図6. アライメントのずれによる利得への影響

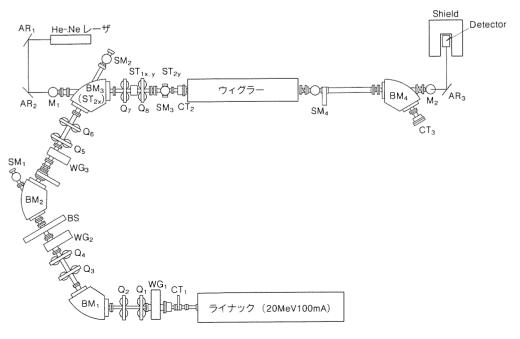


図7.実験系のレイアウト

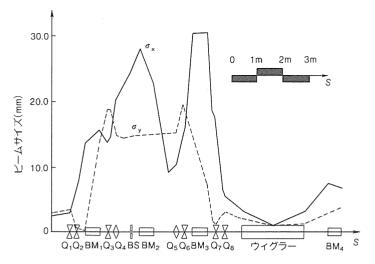


図8. ビーム輸送系でのビームサイズ

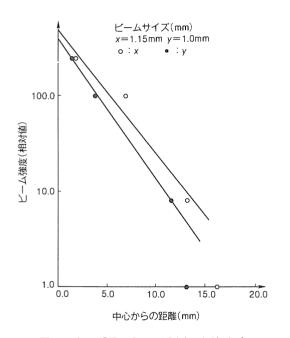


図9. ウィグラー入口でのビームサイズ

す。ビームラインは、偏向電磁石 3 個 ($BM_1 \sim BM_3$)、四極電磁石 8 個 ($Q_1 \sim Q_8$) で構成されている。また、電子ビームパラメータの測定及び電子ビームとウィグラーのアライメントを行うためのモニタがある。ビーム形状測定用ワイヤグリッドモニタ ($WG_1 \sim WG_3$)、位置測定用スクリーンモニタ ($SM_1 \sim SM_2$)、電流測定用 CT ($CT_1 \sim CT_3$)である。ビーム輸送系の各位置でのビームサイズを計算した値を図8に示した。また、スクリーンモニタによるウィグラーの入口及び出口でのビームサイズ測定結果を図9と図10に示した。入口でのビームサイズは垂直方向1.0 mm、水平方向1.15 mm、出口ではそれぞれ0.464 mm、0.714 mm であり、計算値とよく一致している。

光共振器には銅基板に金を蒸着した球面ミラーを用いている。レーザの出力側のミラーには中心に直径1mmのピン

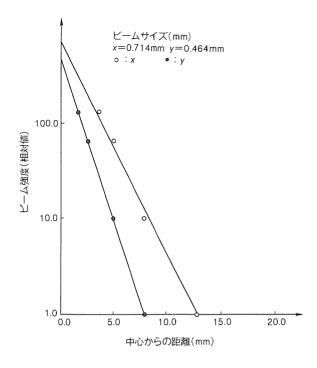


図10. ウィグラー出口でのビームサイズ

ホールが空けてある。共振器間距離は、ステッピングモータ で駆動でき $2\mu m$ の精度で調整できる。また、ミラーの傾き は、ピエゾ素子で調整でき $10\mu rad$ の精度が得られる。

4. む す び

非線形,線形の2種類のシミュレーション コードを開発した。その結果,自由電子レーザの挙動がかなり詳細に解析できるようになった。また、基礎的な実験から電子ビーム及びウィグラー磁場の計測制御技術の確立ができた。

しかし、レーザ発振のためには自発放射過程の解析、アライメント技術の確立等解決しなければならない問題は数多く 残存している。

シミュレーション コードの開発で、大阪大学レーザー核 融合センターの三間圀興教授に多大なる御助言をいただいた。 ここに、深い謝意を表す。

参考文献

- (1) LaSala, J. E., Deacom D. A. G., Scharleman, E. T.: Nucl. Inst. Meth., **A 250**, 389 (1986)
- (2) Sato, S., Yasojima, Y., Nakata, S., Tsukishima, C., Hifumi, T., Okuda, S.: Nucl. Inst. Meth, A 304, 649~653 (1991) to be published
- (3) Sato, S., Yasojima, Y., Nakata, S., Tsukishima, C., Hifumi, T., Okuda, S.: Monbusho Japan-US Workshop on Free Electron Lasers and Their Applications, 249 (1991)
- (4) Madey, J. M. J. : IL Nuovo Cimento, 50, 64 (1979)

大阪府水道部納め送水管理システム

吉原秀樹* 小数賀 嘉男* 野中忠彦** 後藤隆久*

1. まえがき

大阪府水道部送水管理システムは昭和44年に導入されて 以来,水(浄水)需要の急増と給水域の拡大に伴って順次拡 張されてきた。このたび、村野浄水場を拠点とした送水施設 の一元的な管理運用による府下各市町村に対して安定かつ公 平で、また経済的な水道水の供給を行うことを目的とする新 しい送水管理システムの運用を開始した。これにより、計画 的な送水による安定で経済的なポンプ運転が行えたり、ポン プ故障等の送水設備異常時に、総合的な判断に基づく適切で 迅速な対応などが行える。

このシステムは、送水管理センター(以下"センター"という。)と各ポンプ場、浄水池等を PCM (Pulse Code Modulation)多重無線回線によって結び、施設情報や制御情報を伝送し、集中遠隔監視制御を行うのみならず、三島、庭窪の各浄水場系送水施設を含めた広域送水管理システムである。本稿では、この大規模な総合的水運用に適した集中管理システムである大阪府水道部送水管理システムについて述べる。

2. 大阪府の水道施設の特長

(1) 送水系統

大阪府上水道送水システムの全般は、現在、第7次拡張事業が進行中であり、これが完成すると1日最大給水能力は累計で265万m³の予定であり、大阪市を除く府下31市9町1村に給水する全国一の水道用水供給事業となる。また、加圧を目的とした中継ポンプ場や浄水池が大阪府ほぼ一円に設置されており、前記第7次拡張完成後には、導水・送水管路の

総延長は558 km にもなる予定である。この送水管理システムは、取水・導水・浄水プロセスを除き、水道施設全般の管理・運営を受け持っており、そのセンターが水道部最大の約180万 m³/日の浄水能力を持つ村野浄水場(枚方市)にオープンした(図1)。

(2) 送水管理システムの役割

大阪府水道における送水管理システムの導入目的は、府民の生活基盤となる水道の安定供給を確保することであり、その手段となる送水管理設備の信頼性をこのシステムによって更に高めた。この送水管理システムの位置付けと役割を、図2に示す。

3. 送水管理システムの概要

3.1 概 要

このシステムは、PCM 多重無線設備、情報伝送設備、監視制御設備等で構成される(図3)。

無線設備は、センターとポンプ場等の間の情報伝送路として PCM 多重無線装置・多重端局装置・空中線等からなる。 回線経路に関しては、各ポンプ場を直接接続する第 I ルートと、生駒山中継局を経由する第 II ルートの両ルートで情報連絡が行える(図 4)。センターに設置の無線設備について、マイクロ波鉄塔・空中線を図 5 に、無線装置・端局装置等を図 6 に示す。

情報伝送設備は、情報伝送装置、通信制御装置等からなる。 前者は、無線回線を伝送路として、各ポンプ場等を監視制御 するための信号を送受信する遠方監視制御機能を持っている。 PCM 多重端局装置との伝送路接続には、PCM 0 次群信号



図1. 送水管理センターの中央管理室全景

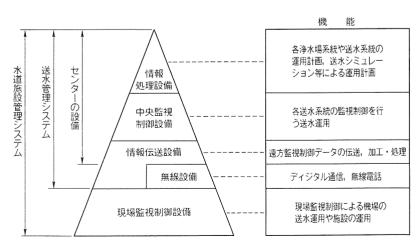


図2.送水管理システムの位置付けと役割

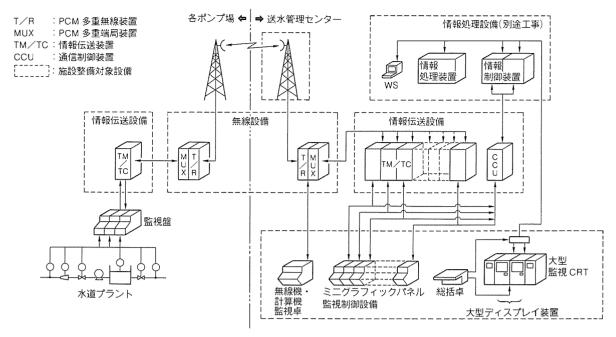


図3. 送水管理設備システムの構成

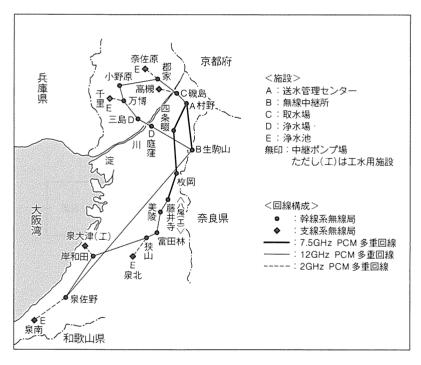


図4. 大阪府水道部多重無線回線の構成

(端局での異速度多重化の基本速度となる64kbps の信号) によるディジタル接続方式を採用している。後者は、情報伝送装置でセンターに集中した通信データを、効率良く情報処理設備へ渡す役目をしている。センターの情報伝送装置(親局)を図7に示す。

中央監視制御設備は、送水施設の運転状態を正確に把握し、 システム運用上に必要な操作をするための設備である。これ は、各ポンプ場の監視制御を行うミニグラフィック付き監視 操作卓、主として無線設備の監視制御を行う無線機・計算機 監視卓、系統全体の監視を行う大型ディスプレイ装置等から なる AV (Audio Visual) システムで構成される (図 8)。これらのうち、AV システム等の近景を図 9 に示す。

3.2 設備構成

送水管理システムの設備構成を表1に示す。 整備に伴う対象施設は、センター(村野浄水 場)のほかポンプ場12箇所をはじめとする 取水場・浄水場・浄水池・無線中継所など計 22箇所である。

4. システムの特長

4.1 高信頼度化

(1) 通信経路の2ルート化

図4で説明したように、無線回線の2ルート化(主要局間のループ化)により、1無線区間の断においても情報の途絶がなく、伝送路の信頼度が大幅に向上した。

しかも,無線回線の2ルート化とともに, 情報伝送装置の通信・処理コントローラ部

(以下"コントローラ部"という。)も二重化することにより、遠方監視制御用のデータ通信も大幅に高信頼度化された。この様子を図10に示す。幹線に設置される情報伝送装置(村野向け子局)は、センターの各親局装置との間で2ルートの伝送路を介して、それぞれの装置のコントローラ部が接続される。そしてその各ルートは各子局と村野局(センター)との間で逆回りに接続されるため、データ通信経路がトータルとしてループ化された伝送路構成となる。このため、北系回線、南系回線のいずれも、各ルートの1区間内に通信不能となる障害が発生した場合でも、健全な経路に切り替わって通

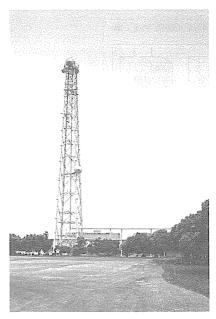


図5. センターのマイクロ波鉄塔・ 空中線

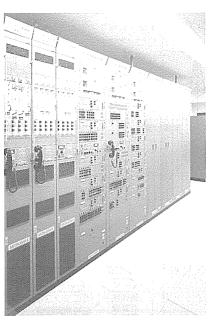


図6.センターの無線装置、端局装置等

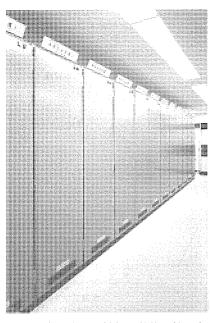


図7. センターの情報伝送装置(親局)

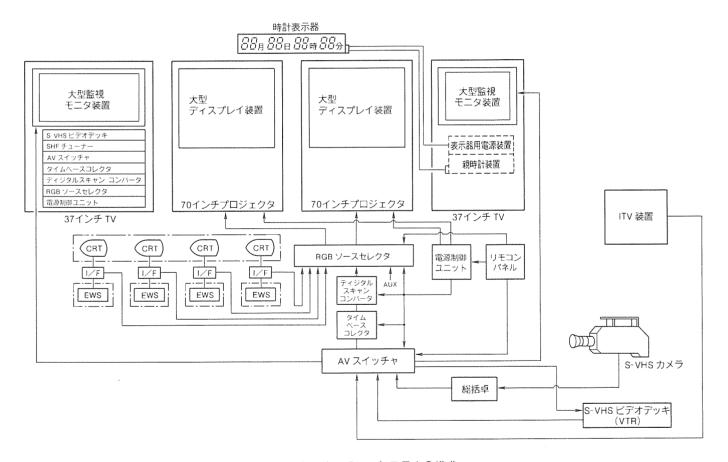


図8. センターの AV システムの構成

信を行えるように構成した。

(2) ディジタル通信網の構築

無線設備の通信方式に関して、従来のアナログの周波数分割多重 (FDM) 方式からディジタルの時分割多重 (TDM) 方式とし、データの伝送速度、効率を飛躍的に高めた。また、多中継による伝送品質の劣化を防ぐため、ディジタル中継

(1.544 Mbps 又は 64 kbps) とし、全系を強結合方式による網同期構成とした。同期系のマスタ局は村野局に設置し、サブマスタ局は生駒山局とした。

なお、このシステムの通信網で伝送される情報には、① 遠方監視制御用に情報伝送装置で符号化されたデータ、② 各種の無線電話(打合せ回線用、60 MHz 帯 VHF 業務用、電 力会社との間の電力保安通信用)等がある。

(3) 情報伝送装置の二重化独立切替方式

このシステムでは、伝送路と情報伝送装置の子局コントローラ部、親局コントローラ部を診断した上で、各々健全な系

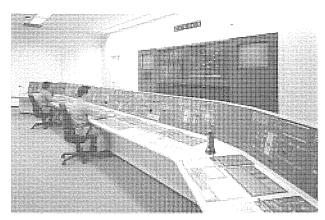


図9. センターの AV システム近景

を,独立に組み合わせて切替接続する二重化独立切替方式とした。伝送ルート(対向通信路)に対する子局,親局各コントローラ部の二重化独立切替えの系統を図11に示す。図示のとおり,2ルート化されている伝送ルートと子局,親局各各二重化されているコントローラ部との接続の組合せは,8通り $({}_2C_1\times{}_2C_1)$ ある。これらの切替えは通常,情報伝送装置の子局,親局各々で回線,コントローラ部の障害診断を行い,自動切替えを行っているほか,手動による切替えも可能である。このため,個々の回線障害や装置の部分障害に対してだけでなく,これらの組み合わさった障害に対しても、データ通信が不通となることが極めて少ない。

(4) 監視操作卓も含めた(1:1)×N対向方式

情報伝送装置の対向方式だけでなく、センターの監視操作 卓も各ポンプ場ごとに独立した構成とした。これにより、故 障の波及が限定され、稼働率が高く保守性が良好などの利点 がある。

表1. 送水管理システムの設備構成

(1) 送水管理センター

設備の主要構成		数量	備考
	PCM 多重無線装置	3 台	7.5GHz 帯×2 12GHz 帯×1
無 線 設 備	PCM 多重端局装置	3 台	
	空 中 線(パラボラ)	3 基	7.5GHz 帯用×2 12GHz 帯用×1
情報伝送設備	情報伝送装置(親局)	12組	MELFLEX 420, 2架1組(場内親局1組含む。)
加 对 乙 以 州	通信制御装置	3架1組	MELFLEX 420
	監視操作卓	12卓	村野場内用×1, ポンプ場用×11
	無線機・計算機監視卓	1卓	
中央監視制御設備	総 括 卓	1卓	
	大型ディスプレイ装置	1式	70インチプロジェクタ×2, ほか (AV 3.7.7.7.1)
	大型監視モニタ装置	1式	37インチ AVTV×2, ほか (AV システム)

(2) 各ポンプ場の構成例

設備の主要構成		数量		備考				
		支線無し	支線有り	749 749				
	PCM 多重無線装置	PCM 多重無線装置	2台	2 台	7.5又は12GHz 帯			
for.	無 線 設	设備	en H⊨ P	PCM 多重端局装置	1台	1台		
344		说 7用	PCM 多重無殺	az 1/A	PCM 多重無線装置(2GHz 帯)	************	1台	一次群端局部内蔵
					空 中 線(パラボラ)	2 基	3 基	
情報伝送設備		・ 備	情報伝送装置(村野向け子局)	1組	1組	MELFLEX 420, 2架1組		
		, MII	/ (支線用親局)	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	1 組	" "		

(3) 浄水池の構成例

N	設	備の主要構成	数 量	備考
無 線 設	備	PCM 多重無線装置(2GHz 帯)	1台	端局部内蔵, ポンプ場との間の回線経路は単一なる も使用チャネルの二重化を実施
		空 中 線(パラボラ)	1 基	
情報伝送設	備	情報伝送装置(ポンプ場向け子局)	1組	MELFLEX 420, 2架1組

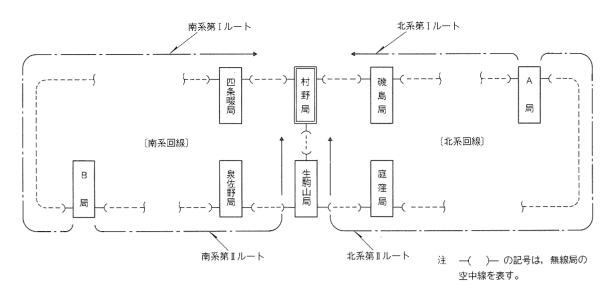


図10. 無線回線のループ化

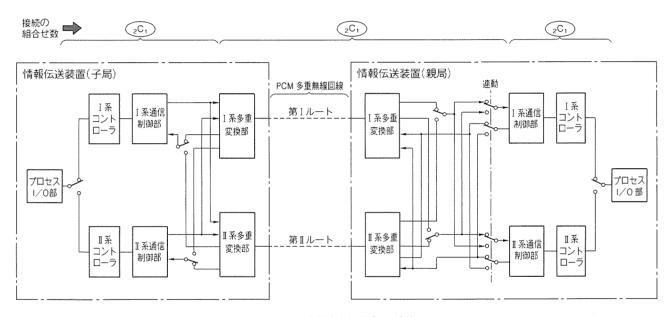


図11. 二重化独立切替えの系統



図12. HDLC 符号形式

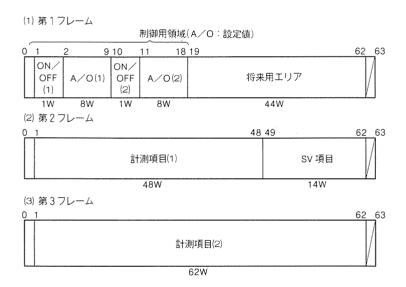
4.2 通信処理の高度化

(1) HDLC 符号のサイクリック ディジタル方式 優れた伝送制御方式である HDLC (ハイレベル データリンク制御手順) 符号を, このシステムのサイクリック ディ ジタル方式情報伝送に適用した。このため、多重のデータを 高速に誤りなく伝送することができる。

このシステムにおける符号形式を図12に、情報伝送フレーム、ワードアドレス割付けを図13に示す。この符号方式



(a) ポンプ場→センター



(b) センター→ポンプ場

図13. 情報伝送フレーム,ワードアドレス割付け

表2. 本システムにおける主な伝送方式仕様

項目	内 容
伝 送 路	PCM 多重無線回線 (12GHz, 7.5GHz, 2GHz 周波数帯のマイクロ波)
伝 送 方 式	サイクリック ディジタル伝送方式
伝送符号方式	HDLC 方式
伝 送 速 度	2,400bps
符号形式	NRZ 符号
符号方式	HDLC シーケンス符号
誤り検定方式	16次 CRC (巡回符号) 検定方式 生成多項式: X ¹⁶ +X ¹² +X ⁵ + 1 制御は上記に定マーク検定を併用
伝 送 形 態	常時伝送
制御方式	ON-OFF 制御及び設定値制御
伝送項目数	ポンプ場→センター:アナログ計測84量, パルス計測 6 量*, 表示408点 センター→ポンプ場:ON-OFF 制御200ポジション, 設定値制御16量

注 * パルス計測は BCD 3 けたが 1 量に相当

の特長は、伝送効率の良さや符号誤り検定能力の 優秀性などである。

なお,このシステムにおける主な伝送方式仕様 を,表2にまとめて示す。

(2) データ送・受信周期に同期 した PIO アクセ ス方式

子局と親局間の監視データの伝達時間をより速めるために、HDLC 通信の送信(又は受信)周期に同期して、各信号のPIO(プロセス入出力部)アクセス処理を起動する方式とした。この方式の採用によってデータの伝達遅延が抑えられ、監視データの応答性が従来よりも大幅に改善された。

(3) 回線との64 kbps ディジタル接続

PCM 多重端局装置と情報伝送装置の結合に、PCM 0 次群信号による接続を実現した。これにより、従来の音声帯域利用のFS 方式に比べてはるかに高い伝送品質を得ている。なお、このシステムでは情報伝送装置内に PCM 0 次群多重端局部を内蔵して、データチャネルの異速度多重化を行っているが、将来、情報伝送装置以外のデータ端末をこの多重端局部に接続して、チャネル多重利用も可能なように考慮している。

(4) システム生成情報メンテナンスの

ユーザー開放

新たな情報伝送装置では、アナログ計測信号の 子局入力信号種別、項目のスケール等のシステム 生成情報のメンテナンスをユーザーに開放してい る。このため、信号の生成情報が変更になる都度 行っていたハードウェア改造、調整等が省略でき、 ユーザーが装置のデータモニタ用パネルを操作し、 設定変更を行うことで対処できるようになった。

4.3 中央監視制御設備

中央監視制御設備はオペレータが常に接することから,監視・操作性,意匠デザインを含めた親密性が重要であり,このシステムではこの点とざん新な技術を以下に述べるように整合させた。

(1) 監視操作卓へのEL ディスプレイの採用等

監視操作卓盤面に取付けの選択計測用数値表示器に、640×200ドットのEL (Electro Luminescence) ディスプレイを採用し、画面上にオレンジ色で8項目分の選択表示が行える。この表示できる項目も、オペレータの設定で変更可能にした。選択計測項目の名称や設定値制御の内容は漢字で表示させており、オペレータの誤認の防止を図っている。監視操作卓はこのほか、次のような特長を持っている。

(a) 操作面に、操作手順を分かりやすく配置し、

各ポンプ場用に統一する目的で、このシステム専用に開発した一体化フラット スイッチパネル (LED 照光式) を埋め込んだ。

- (b) 水道施設等の稼働状態を表す監視部は、盤面の変更が容易なミニグラフィック式モザイクパネルとしたほか、高密度実装によって卓自体もコンパクト化した。
- (c) リモート入出力装置を組み込み,高速シリアル通信ラインで情報伝送装置(親局)との各種の信号のやり取りを行い、信号接続ケーブルを大幅に減少させた。

(2) 通信回線網監視制御の一元化

システムに共通の無線機・計算機監視卓を設け、通信回線網全体の監視制御が独立して行えるようにした。これには、無線回線網をグラフィックに表した監視部に、無線設備や情報伝送設備の稼働状況、上り通信データの使用中経路などを表示させている。これにより、通信回線網の状況把握を容易にし、全局の無線機等の操作が1箇所で可能となった。

(3) 大型ディスプレイの利用

系統監視用に近年流行の70インチプロジェクタ表示装置を2台設置し、センターにおける複数オペレータでの監視を容易にしている。これは、情報処理設備で編集加工された系統、配管やトレンドグラフなどの画面を6入力2出力のソースセレクタで信号を切り替えることにより、適宜必要な情報

を総括卓から選択できる。

(4) 大型監視モニタの利用

ブラウン管方式の37 インチ AV システム用テレビを使用しており、大型ディスプレイ装置の両サイドに設置し、ITV、ビデオなど多様な映像を適宜表示することができる。表示させる映像は、5 入力 2 出力の AV スイッチャで切替可能としている。

5. む す び

安全な水道水を常に安定して府民に供給するために,広域 送水管理システムの果たす役割は,ますます重要なものとな る。限りある水資源を無駄なく有効に活用し,経済的に運用 管理を行うために,今後共,送水管理システムの一層の充実 に努力する所存である。

末尾ではあるが、このシステムの設計・施工・調整に当たり御指導及び御協力いただいた大阪府水道部の関係各位に対し、深い敬意と謝意を表する。

参考文献

- (1) 辻本三郎:水道産業新聞 (1990-6-21)
- (2) 大阪府: くらしの水(府営水道のあらまし) (1989-5)

西武鉄道(株)向け運行管理システム(SEMTRAC)

月岡誠治* 岩井 昇* 舘 精作** 村木一巳*** 浅野和彦*

1. まえがき

西武鉄道は池袋線・新宿線の2大本線のほかに西武秩父線をはじめとする7つの支線を擁している。沿線の観光地と首都を結ぶ近郊鉄道として,また首都圏の拡大に伴って通勤・通学を主体とした都市間連絡鉄道として,池袋・西武新宿の両ターミナルを中心とした高密度な列車運行を行っている。こうした輸送事情のもとで,さらに行き届いた旅客サービスを提供するために支線も含めた池袋線・新宿線の2大路線系に対し,運行管理システム("SEMTRAC"(Seibu Multiple Traffic Control System))の導入が一挙に図られることとなったのでその内容を紹介する(図1参照)。

2. 制御対象路線の規模

このたび、このシステムを導入したのは池袋線系(池袋線・西武秩父線・狭山線)の81.0km、及び新宿線系(新宿線・拝島線・国分寺線・西武園線)の72.0kmである。その制御対象規模を表1に示す。

3. システム構成(1)

3.1 システム構成の基本的な考え

SEMTRAC システムの構成を図2に示す。このシステム は次に示す4点の考えで構成している。

3.1.1 システムの基本構成

池袋線系,新宿線系共各駅(停車場)に駅制御装置を分散 配置し、制御機能を分担させる駅分散方式を基本としている。 ただし、路線の特色も考慮し、西武秩父線(既設 CTC (注1)



図1. 運輸司令所

区間) 又は国分寺線区間に対しては1台の駅制御装置による 集中制御方式を採用している。また、全線一斉停止を防止し、 ダイヤ乱れ時の対応を容易にするために、池袋線系・新宿線 系を各々独立したシステムとしている。

3.1.2 専用伝送系ループ構成

中央司令所の装置と駅に設けられた装置を通信結合するために、光ファイバを用いた専用伝送系を設けている。専用伝送系ループを上記路線系に各々一式設け、両線系の独立を確保している。伝送路故障による駅切り離しの事態を防止するために、池袋線系・新宿線系とも都心のターミナルと所沢間は池袋線から新宿線をまたぐルートでループを構成する。

3.1.3 マンマシン

(1) 中央司令所

指令操作卓、司令長卓、システム監視卓、ダイヤ入力用フロッピーディスク装置、漢字プリンタ2台及びダイヤ入力用端末を設けている。指令操作卓は1卓当たり操作入出力用キャラクタディスプレイと表示用グラフィックディスプレイを各1台ずつ配置し、これを両線系共3卓設けている。これにより、繁忙時にはライトペンを用いて3卓並列の運転整理作業が可能である。司令長卓は上記ディスプレイを各1台ずつ設け、必要に応じて線系を切り替えて入出力できる。システム監視卓は監視パネルと表示端末から成り、システム構成機器の動作状態のランプ表示・故障内容のCRT表示を行っている。

(2) 停車場

駅卓とプリンタを設けている。これを用いて、自駅を中心 とした列車運行状況、駅ダイヤ等が確認でき、さらに中央ダ ウン時の運転整理、入出庫制御等の入力ができる。

(3) 乗務所, 信号通信区(又は管理所)等の運転関連事務所

(注1) Central Traffic Control (CTC:列車集中制御装置)

表1.制御対象規模

項目	池袋線系	新宿線系
_[(1) 基本ダイヤ種別	8 種類	14種類
-(2) 最大列車本数(1日当たり)	2,000本	2,000本
-(3) 最大同時在線列車本数	70本	80本
-(4) 列車種別	15種類	15種類
-(5) 制御駅数(信号所含む)	29駅	25駅
-(6) 制御対象総進路数	430進路	330進路

注 (2), (3)はシステムにおける最大値

運転情報端末とプリンタを設けている。これを用いて4.6 節に示す各種運転情報の確認ができる。

(4) 停留場の各駅

列車運行状況を表示する在線状況端末を設けている。

3.1.4 駅の装置構成

停車場には駅制御装置と駅卓を設けているほか、継電 I/O 装置(今回のシステム導入に際して設けた連動装置と駅制御装置とのインタフェース装置)・列選(列車選別)駅チェック装置、表示用の案内制御装置(停車場用)、案内放送装置等の制御対象装置を設けている。停留場には在線状況表示端末及び案内制御装置(停留場用)を設けている。

3.2 各計算機システム構成と役割

各計算機システムの構成諸元については表2に示す。

3.2.1 中央装置の役割と構成

中央の指令所には中央計算機・表示制御装置・運転情報伝送装置・在線状況表示装置・ダイヤ入力装置を設けている。 これらはいずれも32ビットスーパミニコン《MELCOM 350 -60シリーズ》で構成される。

(1) 中央計算機

中央計算機は中央管理装置と通信管理装置とで構成され、 中央管理装置はダイヤの管理を始めとする情報処理を行う。 通信管理装置は各駅との間のデータ通信(ダイヤを送りつつ 運行情報の継続的収集ができるように、ダイヤや各種制御情報を駅に送る回線と連動情報及び運行情報を中央に送る回線を各駅分設けている。)を管理し、駅に送る情報の分配、駅からの情報の収集等を行う。

(2) 表示制御装置

各駅ごとに1回線を設け、さらに運行表示盤との間も回線で接続し、各駅から集信した情報を編集して運行表示盤に表示させる。

(3) 運転情報伝送装置・在線状況表示装置

両線系の中央管理装置から列車の運転情報,システム機器の状態情報等を入手し,専用伝送系を介し運転関連事務所30箇所にある表示端末に配信する。在線状況表示装置は列車の在線状況情報を40停留場の表示端末に配信する。

(4) ダイヤ入力装置

システムで用いる基本ダイヤすべての入力・編集・修正処 理を行う。処理結果をフロッピーシートに出力し、中央管理 装置に受け渡す。

3.2.2 駅制御装置の役割と構成

駅のシステム構成機器の中核をなすのは駅制御装置である。 駅制御装置の役割と構成は以下のとおりである。

(1) 駅制御装置の役割

駅制御装置は基本的に自駅分のダイヤを中央から分配され

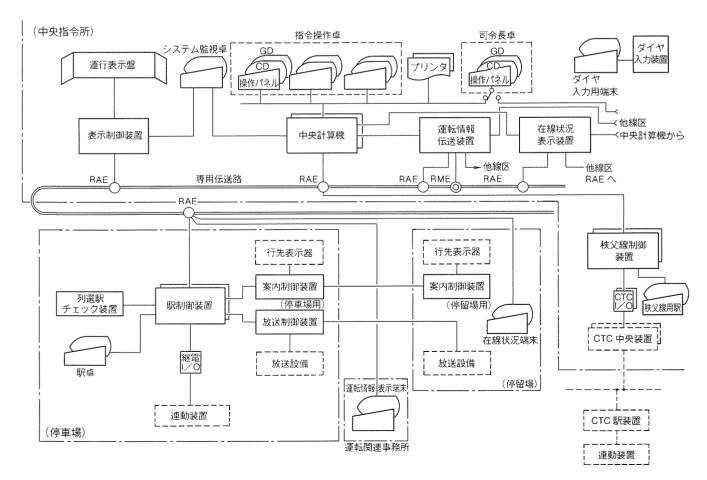


図2.システム構成(1線区分のみ)

て持ち、連動装置から入力した情報を基に列車追跡・自動進路制御を行う。さらに、駅制御装置は風速・雨量等の気象情報も外部の計測器から入力していて追跡結果とともに中央に送付している。

駅制御装置の管理範囲は、"自駅とその前後の停留所"を原則としているが、既設 CTC 設備を用いる西武秩父線区間に対しては秩父線制御装置が9停車場1信号所を、同様に拝島線小川駅制御装置は小川駅と国分寺線3停車場1信号所を、各々複数駅管理している。

(2) 駅制御装置の構成

駅制御装置は各駅の特性を考慮し、主要駅を並列二重系としている。PIO (プロセス入出力装置) で継電 I/O 装置・列選駅チェック装置と接続し、案内制御装置、案内放送装置とは通信回線で接続している。既設 CTC 設備との間はCTC I/O 装置を設けて、この間を高速回線でインタフェースをとっている。駅制御装置には表示・入力用端末として駅卓を設け通信回線で接続している。

3.3 専用伝送系の構成

専用伝送系は固定接続方式のLAN《MELNET-R32F》を 用いている。

その主な特長は次のとおりである。

- (1) 長波長光ファイバケーブルの採用 15 km の無中継伝送が可能なように1.3 μm のシングルモード光ファイバケーブルを用いている。
- (2) RAS^(注 2)機能並びに高信頼度対策

二重化リング バイパス ループバック等の RAS 機能を持たせるとともに、伝送管理装置 $(RME^{(\pm 3)})$ を二重化させている。

(3) 迅速な立ち上がり時間の確保

2日に一度の駅電源停止に対して復電後の動作安定時間を1 秒以内とし、迅速な立ち上がり時間を確保している。

(4) "伝送系異常"情報の扱い

RME で検知した伝送系異常情報をシステム監視卓に表示・警報している。また、伝送系異常の情報を保守管理部門の信号通信区(又は管理所)にある情報端末にグラフィック表示するために RME と運転情報伝送装置の間に通信回線を1回線設けている。

4. システムの機能

4.1 機能概要

広域分散形を採るこのシステムは"管理は集中,制御は分散"の考えを基に表3に示す13機能からなる。このうち, このシステムに特徴的な機能を以下で詳細に述べる。

4.2 ダイヤ管理

(1) ダイヤの作成

基本ダイヤと基本ダイヤから派生した波動輸送用の基本変

- (注 2) <u>Reliability</u> (信頼性) <u>A</u>vailability (可用性) <u>Serviceability</u> (保守性): RAS
- (注3) Ring Management Equipment: RME

表2. SEMTRAC システムの計算機構成諸元

		台		数
装 置 名	C P U形名		新宿線系	共通
(1) 中央管理装置	MELCOM 350 · 60/600	2	2	
(2) 通信管理装置	MELCOM 350 ⋅ 60 ∕ 300	2	2	
(3) 表示制御装置	MELCOM 350 ⋅ 60/300	1	1	
(4) 運転情報伝送装置	MELCOM 350 ⋅ 60/300			1
(5) 在線状況表示装置	MELCOM 350 ⋅ 60/300			1
(6) ダイヤ入力装置	MELCOM 350 · 60/300			1
(7) 駅制御装置	MELCOM 350 · 60/200D	35	39	

表3. 運行管理システムの機能概要

機能項目	内 容	中央 計算機	駅制御 装置	その他
ダイヤ管理	進路制御と案内表示・放送の自動化のためシステムで扱うダイヤを管理する。	0	0	
列車追跡	各種制御と運行状況監視のために継電連動情報を もとに列車の追跡を行う。	0	0	
進路制御	実施ダイヤに基づき自動進路制御を行う。		0	
案内制御	実施ダイヤに基づき行先表示器と自動案内放送を 制御する。		0	
列選監視	列選駅チェック装置が設けられる駅においてチェ ック対象列車の照合を監視する。	0	0	
運転整理	ダイヤ乱れに対応し、提案自動・手動の運転整理 を行う。	0	○ (駅卓)	
運行状況監視 気象等状況監視	追跡結果から運行状況の表示を行う。また,沿線 の気象状況等の監視を行う。	0	0	(表示制御)
ダイヤモニタ	システムで所有するダイヤを操作卓の CRT 及び 漢字プリンタに表示・印字する。	0	○ (駅卓)	(情報端末)
運転情報伝送	運行状況等の情報を運転情報伝送装置から情報端 末に表示する。	0		0
列車運転記録	後方業務として各種運行記録・統計資料等の記録 をフロッピー,プリンタ等に行う。	0	0	
システムサポート	時刻補正,システム定数管理,データ保全,システムトレース記録等	0	0	
運用支援	制御・追跡モード管理,列番修正,線路閉鎖予約 等	0	0	
システム異常監視	システムを構成する各機器の異常を監視し, 警報 出力する。	0	0	(情報端末)

更ダイヤはすべてダイヤ入力装置で作成し、中央管理装置で管理する。中央管理装置では基本ダイヤを池袋線系14種類・新宿線系8種類、基本変更ダイヤを両線系共10種類格納できる。

(2) 日単位ダイヤの変更

日単位変更ダイヤ作成機能により、ダイヤの適用に先立ち 判明している臨時増発等の変更内容を日単位変更ダイヤとし て入力し、登録できる。中央管理装置では日単位変更ダイヤ を連続した7日分所有できる。

(3) 実施ダイヤの作成及び駅への転送

制御に用いる実施ダイヤは、指定された基本ダイヤに適用 日の分の日単位変更ダイヤを加えて作成される。中央管理装 置の磁気ディスクでは当日・翌日・翌々日の3日分管理し、 終夜運転時の連続制御も可能としている。中央管理装置の主 記憶上のダイヤは指令入力によって各駅に転送されて駅制御 装置の制御ダイヤとなる。駅制御装置にも3日分を持たせて いる。

(4) 実績ダイヤの作成

運転終了時点でその日の実施ダイヤに各駅での着発実績を 追加して実績ダイヤを作成する。実績ダイヤは3日分管理さ れる。

(5) 運転パターン情報の作成

西武球場の野球の終了・うち切り・中止(以下総称し"終了"という。)時にタイムリーに観客帰宅輸送を行う必要がある。このため、ある特定時刻からほぼ5分ピッチに観客数に応じた臨時列車を増発する輸送計画を運転パターンとして持つ。運転パターンはダイヤ入力装置の"運転パターン作成"機能で運転整理項目の集合として作成される。運転パターンは1種類につき平均100個の整理項目から成り、池袋線系で240、新宿線系で250の計490種類設定できる。

(6) 運転パターン情報の格納

上記の運転パターン情報は、ダイヤ改正時に中央管理装置 に登録されるとともに各駅にも転送されて格納される。

(7) 付帯案内情報の作成

このシステムでは"種別", "行き先"等の案内のほか, "先着", "乗換え", "行き先別終電車"等の付帯案内を行う。このためダイヤ作成時にダイヤ入力装置で基本ダイヤを検索して付帯案内情報ファイルを作成する。

(8) 付帯案内情報の登録及び駅転送

付帯案内はダイヤ入力装置からフロッピーシートで中央管理装置に渡され登録される。実施ダイヤを駅に転送する際に付帯案内情報も一緒に送られ、駅制御装置に記憶される。

4.3 運転整理

ダイヤ乱れ時に行う実時間のダイヤ変更を運転整理という。 このシステムでは提案自動,手動整理の2種類設けている。

(1) 提案自動

システムが運行状況から判断し、有効と思われる整理項目

を提案するもので、司令員の承認入力によってダイヤ更新する。提案自動項目として、"接続解除"、"着発線変更"、"待避変更"、"行違変更"の4項目がある。

(2) 手動運転整理

手動運転整理は西武鉄道のあらゆる列車運転形態 (入出庫, 車両交換, 増結解放, 分割併合, 優等列車の待避, 単線区間 の行違変更, その他) を考慮し27項目設けている。

手動運転整理の項目の選択と入力は、次のとおり行われる。すなわち、図3に示す画面でライトペンでヒット入力を与えることによって項目選択され、引き続き表示される項目ごとの入力画面でライトペンとキーボードを用いてデータ入力する。27項目中頻繁に使われる項目については、指令操作卓の操作入力押しボタンで直接入力画面が表示される。データを与えて"転送"指示すると計算機内部で各種の整合性チェックが行われ、中央と駅のダイヤが同時に更新される。更新結果は図4のようにグラフィック ディスプレイに表示される。

中央ダウン時は駅卓を用いて"運休"を始め 6 項目の運転 整理が可能である。

(3) 運転パターン

司令員が野球終了時のパターン番号入力を与えた時、中央計算機と駅制御装置ではあらかじめ格納している運転パターン情報から指示されたパターン番号のものを引き出し、運転整理と同様の処理によって実施ダイヤを書き替える。これにより、臨時列車等の運転が可能となる。

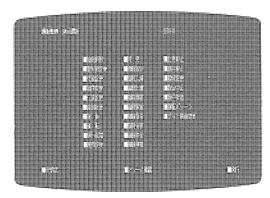


図3. 運転整理項目選択画面

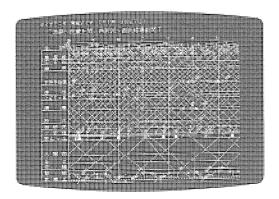


図4. ダイヤモニタ画面

4.4 案内制御

案内制御としてコンコースとプラットフォームの行先表示 及び列車接近時の自動案内放送を行っている。特急専用の案 内表示も行っている。駅制御装置ダウン時の案内表示につい ては案内情報の手動設定,案内放送については接近報知のみ の簡易放送が可能である。

(1) 行先表示

列車出発のタイミングで"種別"、"行き先"、"発車時刻" 等の情報に、4.2節(7)、(8)で記述した付帯案内情報を付加し て案内制御装置に送り出し、案内制御装置でコンコースとプ ラットフォームに設けられた行先表示器を制御している。複 数列車分の先発・次発の別等、行先表示器が設けられるコン コースやプラットフォームの特性に合わせた表示を行ってい る。

(2) 案内放送

列車接近のタイミングで,案内制御同様,"種別"等ダイヤからの情報と付帯案内情報を放送制御装置に送出し,自動案内放送を行っている。

4.5 進路制御

通常の場内・出発制御のほか、以下のとおりのSEMTRA C 特有の制御を行っている。

(1) 車庫内制御

西武鉄道は車庫を利用した車両交換,折り返し運用があるため,車庫内も自動制御対象としている。

(2) 入出庫制御

入出庫制御に下記の機能を持たせている。

(a) 発点・着点入力

車庫内の発点・着点は駅卓を用いて入力指示ができる。 また、事前に複数列車分を一括予約ができる。

(b) 入出庫順序変更·優先指示

駅卓を用いて運転状況に応じて入出庫順序変更ができる。 本線か入出庫かの優先指示もできる。

(3) 所沢またがり列車制御

2線区の接点となる所沢駅では両線区の駅制御装置が会話 し、線区またがり列車の進路制御を行う。

(4) 警戒信号現示制限制御

悪天候時には司令の入力で警戒信号による入場を規制できる。

(5) 方向別・線区別駅扱い

駅扱いを駅ごとにブロック化し、例えば上りを自動、下りを手動と混在して制御可能である。

(6) 自動抑止運転

運行上の必要により、駅間に1列車のみ走行を許可する自動抑止運転が司令の入力によって可能である。

4.6 運転情報伝送

列車運転を円滑に行うために,運転情報伝送装置は両線系の中央計算機から収集した情報を乗務所・車両運用係員詰

所・信号通信区等の運転関連事務所に設けた表示端末に提供 している。表示端末で表示・印字される機能は次のとおりで ある。

(1) 全線在線状況モニタ

両線系共区間ごとに5枚の画面に分割し、駅及び駅間の列車在線状況並びに遅延状況を10秒周期で更新表示する。

(2) 運転整理情報モニタ

運転整理が行われたときその旨報知し、端末側で内容表示 リクエストがあったとき、運転情報伝送装置から詳細データ を提供して端末に表示・印字する。

(3) 駅別ダイヤ情報モニタ

端末からのリクエストに対し、指定駅の指定列車と後続8 列車の着発状況を表示・印字する。

(4) 気象状況モニタ

端末からのリクエストに対し、雨量と風速の監視結果を表示・印字する。雨量については1時間単位の雨量と過去24時間分の累計が、風速については現在風速・過去5分間の最大風速・過去6時間分の1分きざみの最大風速が、表示対象となる。

(5) システム異常モニタ

信号通信区の同端末ではシステムに異常があった場合その 旨報知し、端末側のリクエストに応じてその内容を表示・印 字する。

(6) 伝送系動作モニタ

前記(5)と同様、信号通信区の同端末からのリクエストに対し、専用伝送系の動作状態を、異常発生時はその内容を表示する。

5. む す び

以上、システムの構成及び機能の説明を中心としてSEM TRACシステムの全貌を述べてきた。このシステムは、大規模路線に初めて広域 LAN を採用し、高度な応答性・保守性・拡張性を備えている。機能面については、野球等の急激かつ大幅な輸送変動に対する運転パターン制御、ダイヤ情報の自動検索による旅客案内サービスの充実、各駅各部署への多彩な情報提供を考慮した。十分に役割を発揮して目的に沿えるものと確信している。

最後にこのシステムの建設に際し、御指導、助言をいただいた西武鉄道(株の方々、このシステム構成機器の製作に御協力及び御支援いただいた関係者諸氏に紙面を借りて厚く感謝する。

参考文献

(1) 石田隆朗, 六藤孝雄, 舘 精作, 村木一巳, 祖父江幸男 :最近の列車運行管理システム, 三菱電機技報, 61, No. 2, 89~93 (1987)

中間踊り場付き超高揚程エスカレーター

斉藤良一*治田康雅*岩田明夫*吉川達也*

1. まえがき

近年活発に進められている大型リゾート施設,都市交通機関等の開発に伴い,これら用途の交通アクセスとして高揚程エスカレーターの需要が増加している。エスカレーターは、待ち時間なしで利用できることが大きな特長であり、しかも解放感あふれる快適な輸送手段として評価が高まり、高揚程化にも一層の拍車がかかっている。

一方、エスカレーターに対する要求は輸送手段としての基本機能にとどまらず、乗る楽しさを与えたり不安感を和らげるなどの乗客心理への対応、景観保護や周囲環境との調和、建築に適合するレイアウトの柔軟性、安全機能の充実などが一層重要視される傾向にある。そしてこれらの要求に対応する一つの手段として、中間部に水平走行路を設けた中間踊り場付きエスカレーターが注目され始めている。

今回,これまで培ってきたモジュラー駆動方式(図1)⁽¹⁾による高揚程エスカレーター技術の応用により,中間踊り場付き超高揚程エスカレーターを開発し,平成3年4月香川県にオープンした"レオマワールド"に納入した(図2)。このエスカレーターは世界でも珍しい踏み段走行路の途中に水平走行部分を設けた中間踊り場付きで,しかも揚程42mという東洋一のスケールを誇る。ここに上記エスカレーターの概要について紹介する。

2. 設置背景と仕様

"レオマワールド"は総面積69万 m²の広大な大型レジャー施設であり、多数の入場者を高低差42 m の丘陵地へ快適に 運ぶ輸送手段として当初から

超高揚程エスカレーターの導 入が計画された。

園内には雄大な大自然を背景に美しい森と湖の中に、アミューズメント施設とリゾート施設が点在している。エスカレーターは自然の景観を損ねないように山肌に沿って設置する必要があった。また、超高揚程化に伴う乗客の不安感解消を図るため、全揚程差42mの下部から12m上昇し

た位置に長さ10mの水平走行路を設けることにした。

エスカレーター本体は屋外形となっているが、乗客の利便 性などを考慮して透明の開放形ドームで覆っている。

基本仕様を表1に、また基本レイアウトを図3に示す。

3. 中間踊り場付き超高揚程エスカレーターの特徴

これまで国内では揚程20mを越えるエスカレーターの稼働実績はまれであった。今回、揚程40mを越える高低差を結ぶ輸送手段としてエスカレーターを提案するに当たり、機器側の技術検討を実施するとともに、乗客の安全性、利便性、心理的影響、そしてエスカレーター設置の際のレイアウト性等あらゆる方面からの検討を実施した。高揚程差を結ぶエスカレーターとして図4に示す3通りのレイアウトについて比較した。

エスカレーター 2 台を乗り継ぐ A 方式では特に大きな問題はないものの、エスカレーター乗り継ぎ部で乗客は歩く必要があり利便性に劣る。また、エスカレーターの事故は乗降口での発生確率が高いのも事実であり乗降回数が増える点も好ましくない。さらに、乗り継ぎ付近の乗客の流れをスムーズに保つためには、ある程度のスペースを確保する必要があり、レイアウト性に難点がある。

一方、1台の超高揚程エスカレーターとするB方式ではA 方式の欠点は解消されるが、下降するエスカレーターに乗り 込むときや下降の最中に乗客が高所恐怖感を抱く。また、長

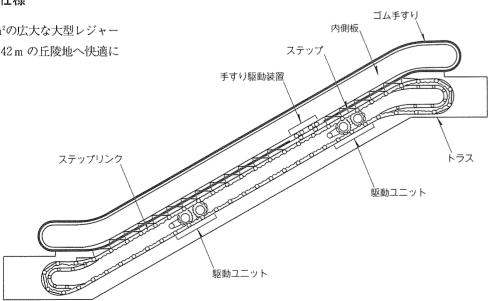


図1. モジュラー駆動方式エスカレーターの構造

時間同一姿勢を保つことに よる疲労感,いらいら感の 発生も否めない。

C方式では上述のA方式, B方式の欠点を解消することができる。エスカレーターの走行途中に中間踊り場を設定することにより,下降途中の乗客の視界から下階側を遮ることが可能である。この場合に,必要な踊り場長さ寸法を図5にない動線の変化が楽しめ,今回のように地形に合わせた設置など新鮮で最適な建築レイである。

4. 構造の概要

4.1 超高揚程化に伴っ た技術課題

4.1.1 始動方式

ステップの駆動はマルチ 駆動(複数の駆動ユニット) システム⁽¹⁾で,10台の駆 動ユニットを分散配置して いる(図3)。

この各駆動ユニットに組 み込まれたモータの始動時 に発生する過大な始動電流 の低減及びエスカレーター 起動時に発生する機器の起

動ショックを低減するために、オートトランスを使用したコンドルファ始動方式を採用した(図6)。起動ショック発生防止は機器の保護及び安全装置の誤動作防止のために有効である。

他の始動方式(**表 2**) とコンドルファ 始動方式を比較してみる。

(1) 順次始動方式との比較

多数のモータのうち一部のモータでエスカレーターを始動させ、その後他のモータを遅らせて始動する順次始動方式と比べ、コンドルファ始動方式はすべてのモータに均等にトルクが発生するため、よりスムーズなエスカレーター起動が可能である。

(2) 人一Δ始動方式との比較

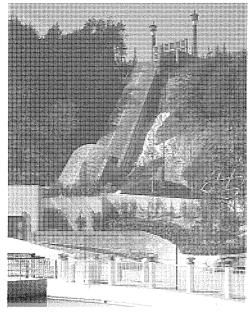


図2. エスカレーター全景



輸送能力 9,000人/h
階 高 42m
上部階高 30m
下部階高 12m
踊り場長さ 10m
電 源 440V 60Hz
電動機容量 5.5kW×10

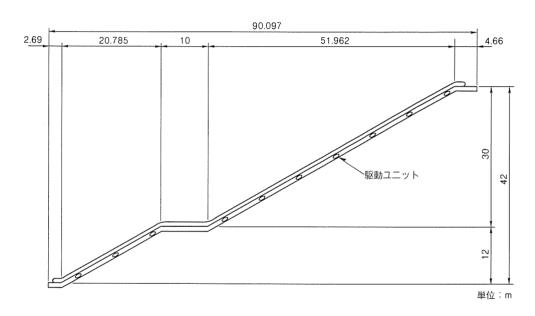


図3.基本レイアウト

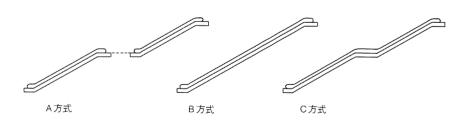


図4.設置レイアウトの比較

人-Δ始動方式は各モータへの配線が6本必要となり、マルチ駆動システムの場合、配線系統が複雑となる。また、始動切替コンタクタもモータと同数が必要となって制御回路も複雑となる。

(3) インバータ始動方式との比較

インバータと比較してオートトランスは部品が単純である

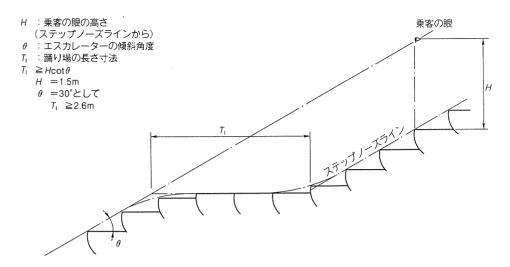


図5. 必要な踊り場長さ寸法

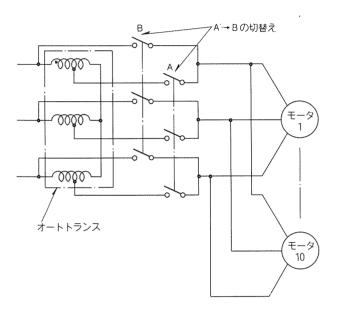


図6. コンドルファ始動方式

ため、信頼性も高く、またメンテナンスが簡便であるなどの 点で有利である。

(4) リアクトル始動方式との比較

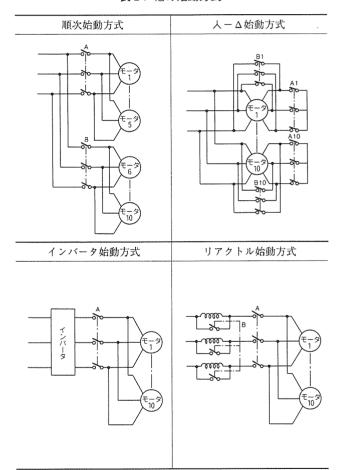
リアクトル始動方式と比較してコンドルファ始動方式は始 動電流を低く抑えることができる。

以上のようにコンドルファ始動方式は特にマルチ駆動システムに適した方式といえる。

4.1.2 各駆動ユニットの負荷分担

また、マルチ駆動システムの場合、各々の駆動ユニットにかかる負荷及びステップリンクにかかる張力がおよそ均等になるように設定する必要がある。さもないと異常負荷の発生や乗り心地の悪化を招くおそれがある。このため各駆動ユニットをエスカレーターの長手方向に移動させるスペーシングと呼ぶ調整を実施している。今回、多数の駆動ユニットのスペーシング調整を容易に精度良く行う方法を確立し、これを実施した。スペーシング調整の実施後の各駆動ユニットのモータ消費電力を測定した結果を図7に示す。

表 2. 他の始動方式



また、ステップリンクの張力分布は理論的には**図7**の破線に示すような分布となる。スペーシング実施後、ステップリンクの張力を測定した結果を**図7**の実線で示す。各駆動ユニットの上部側でステップリンクに圧縮力が作用しているのはモジュラー駆動方式の特徴である。

無負荷運転 (モータ定格の約20%負荷に相当)のため個々のモータ特性の違いなどからばらつきが発生しやすいが、モータ消費電力、ステップリンク張力とも良好な負荷分布結果が得られた。

4.1.3 手すりとステップ との同期性

手すり駆動における技術課題の一つにゴム手すりとステップとの速度の同期性の問題がある。ステップの駆動と異なり、一般にゴム手すりは摩擦駆動されている。このため駆動中に若干のすべりが発生し、諸条件によってこのすべり量が変化する。超高揚程エスカレーターのように、走行機長が長いと低揚程では問題とならなかったわずかなステップとゴム手すりの速度差が累積され乗客の足元と手すり位置のずれが発生する。

図8にゴム手すりが乾燥状態と

水ぬ(濡)れ状態での手すりの同期性についての測定値を示 す。手すり駆動力が小さい場合、走行抵抗の低い乾燥状態の 場合と走行抵抗の高い水濡れ状態の場合との速度差が大きく なる。このことは、たとえ手すりの速度をステップと同期す るように設計したとしても手すりの使用条件の変化により、 ステップとの速度差が発生してしまうということを意味して いる。このため、常にステップとの同期性を保つにはゴム手 すり走行抵抗(特に水濡れ状態)を低減し、ゴム手すり駆動 能力を強化する必要がある。手すり走行抵抗の低減策として 上部と下部のニュアル欄干 (エスカレーター先端のゴム手す り反転部) にアイドラー回転リングを設けるとともに往路と 帰路のゴム手すり案内部に多くのコロを配置した。これによ り、踊り場付きかつ超高揚程でありながら標準揚程エスカ レーター並の結果を得ることができた。また、駆動能力の向 上のため手すり駆動ユニット数も増強し、標準揚程と比べ 10倍以上の駆動力とした。

結果として、手すり乾燥状態及び水濡れ状態ともステップ とゴム手すりの同期性が大幅に向上した。

4.2 中間踊り場付きとするための技術課題

4.2.1 手すり外れ対策

図9の手すり張力分布に示されるように、普通のエスカレーターで手すりのパスが凹形となる下曲部 (A部) には大きな手すり張力は作用しないが、中間踊り場付きとすることによって中間曲部の凹部 (B部) には大きな手すり張力が作用する可能性があり、このとき手すりを外す方向の分力が発生する。さらに、乗客の利用により手すりに様々な方向からの外力も加わる。この手すり外れ対策として手すり走行曲率を大型化し、手すりが外れようとする分力を低く抑えるとともに、万一に備え手すり外れ検出装置を開発し、装備した。手すり外れ検出装置は図10に示すように、手すり内部に配置された強度部材であるスチールテープの距離の変化をセンサ

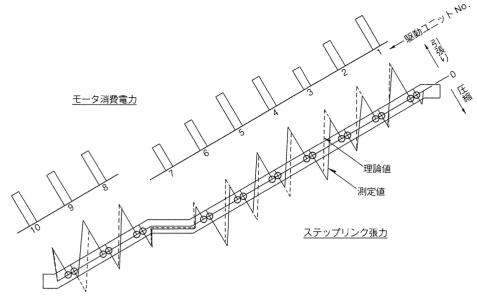


図7. モータ消費電力及びステップリンク張力の分布

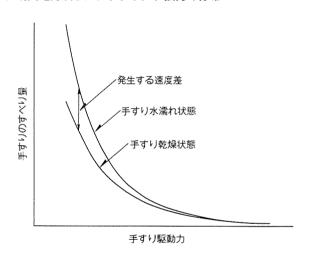


図8.手すり駆動力と手すりすべり量の関係

で検出するものである。

4.2.2 ステップの脈動現象に対する対策

図11に示されるように曲線レールに対し、ステップリンクが直線で構成されているため、そのパスの違いから曲線の前後のローラで移動速度が常に変化する。すなわち、ローラ C_X を速度一定で移動させたとき、ローラ C_Y は速度を変化させながら移動する。この脈動はステップリンクピッチの通過速度の周期で発生するものである。中間踊り場部の前後の傾斜部にステップリンクとか(嚙)み合った駆動ユニットを配置したモジュラー駆動方式の場合、特に脈動によって駆動ユニット上での乗り心地が悪化したり、ステップ上のしゃくりが発生するおそれがある。

図11 においてローラ C_X の法線 A からの距離を X, レール曲線部をはさんで反対側に位置するローラ C_Y の法線 B からの距離を Y とする。このとき脈動量 Δz は X を変化させた際の z (=X+Y) の変化量で表される。z が常に一定ならば脈動は発生しない。ここで,レールの曲率半径を R,エスカレーターの傾斜角度を θ ,ステップリンクのピッチを P

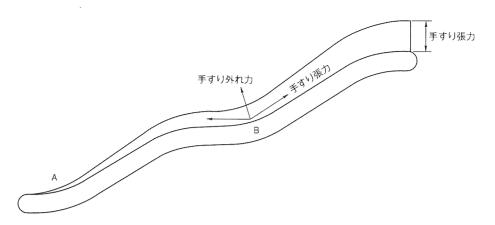


図9. 手すり張力の分布

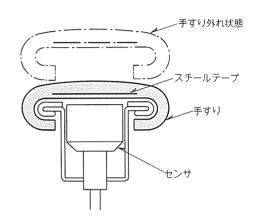


図10. 手すり外れ検出装置

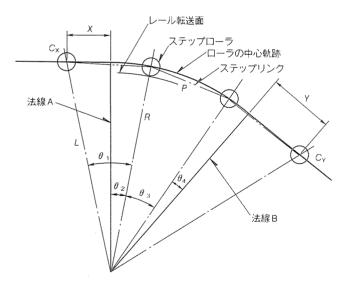


図11. 曲線レールとステップリンクの関係

とすると,

$$\theta_1 = \cos^{-1}(\frac{L^2 + R^2 - P^2}{2RL})$$
(1)

 $2 \text{ CC}, L = (R^2 + X^2)^{1/2}$

$$\theta_2 = \theta_1 - \tan^{-1}(X/R) \quad \cdots \qquad (2)$$

$$\theta_3 = 2\sin^{-1}(P/2R)$$
(3)

$$\theta_4 = \theta - \theta_2 - \theta_3 \cdots (4)$$

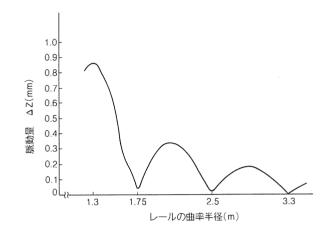


図12. レールの曲率半径と脈動量の関係

ここで、
$$A = R(1 - \cos \theta_4)$$
 とすると
 $Y = (P^2 - A^2)^{1/2} - R \sin \theta_4$ (5)
 $z = X + Y$ (6)

となり、Xの値をX=0からX=Pまで変化させたときのZの値の変化を求めることにより、

図12にレールの曲率半径と脈動量の関係の計算結果を示す。脈動量はレールの曲率半径を適切に選択することにより、最小に抑えることが可能である。計算結果によれば脈動量はステップリンクのピッチが0.408mの場合、曲率を1.75m、2.5m又は3.3mとするのが良く、曲率を1.3mとした場合と比較し、脈動量を1/18以下にすることができる。

今回の踊り場付きエスカレーターでは中間曲部のすべての レール曲率を最適値とすることにより、乗り心地への悪影響 は全く認められなかった。

5. 安全施策

中間踊り場付き超高揚程エスカレーターでは安全機能の充実を図るために、以下に述べる施策を盛り込んでいる(図13,図14)。

(1) 制動特性の改善

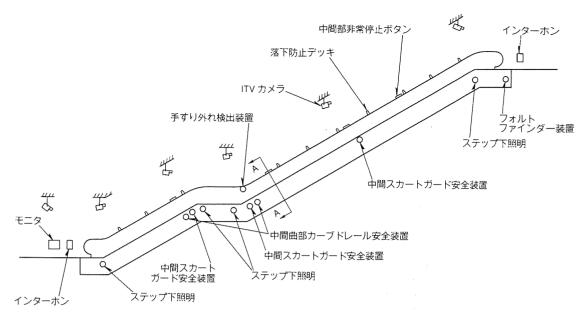


図13. 安全施策の配置

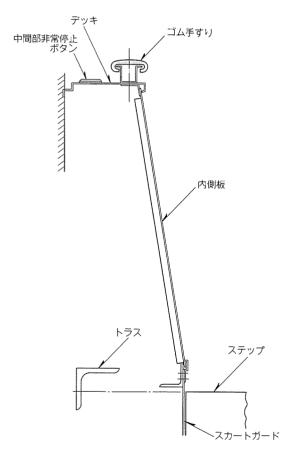


図14. 欄干断面(断面 A-A)

標準揚程のエスカレーターと比べ, ブレーキの制動保持能力そのものを大幅に向上させたほか, 制動減速度を改善し, よりスムーズな停止特性とした。

(2) 上下部水平ステップの延長

乗降口の水平ステップを長くすることにより、乗降の際の 安全性向上を図った。

(3) 手すりスリップ検出装置

ゴム手すりの速度が低下した時,これを検出しエスカレーターを停止させる安全装置を設けた。

(4) 中間スカートガード安全装置

中間傾斜部及び中間踊り場の中間曲部に,従来のスカートガード安全装置と同様の機能を追加配置した。スカートガードとステップの間に物が挟まった時,スカートガードの変位を検出し,エスカレーターを停止させる。

(5) 手すり外れ検出装置

前述のように、中間曲部での手すり外れを検出し、エスカレーターを停止させる安全装置を設けた。

(6) 中間曲部カーブドレール安全装置

中間曲部にも上下曲部と同様の機能をもつカーブドレール 安全装置を追加した。ステップ間に物が挟まった時,ステップの浮き上がりを検出してエスカレーターを停止させる。

(7) 中間部非常停止ボタン

超高揚程エスカレーターの中間傾斜部の欄干上に距離20m間隔で設置した。ステップ上からこのボタンを押すことにより、緊急停止が可能である。

(8) フォルトファインダー装置

安全装置の数が多く、また広範囲に分散していることから 故障の早期発見、復旧のため作動した安全装置を示す表示盤 をトラス内部に配置した。

(9) ITV モニタ

中間踊り場付きエスカレーターの場合,起動停止の操作時に係員がエスカレーターステップ上全体を見渡して安全確認を行うことが不可能となる。この操作時の死角を補うためエスカレーター上にITV カメラを配置するとともに,操作盤付近にモニタを配置した。

(10) 遠隔監視モニタ

エスカレーター運行状況及び乗客の利用状況の管理のため、

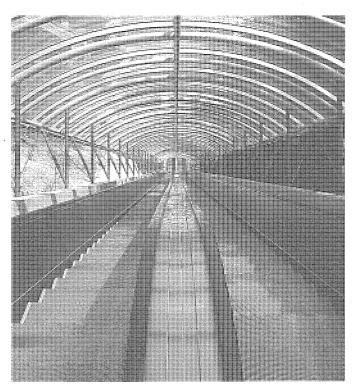


図15. 上部付近から下部を臨んだ状態

監視室にもモニタを設置した。監視室から利用客に対する注意放送も可能である。

(11) ステップ下照明

乗降口及び中間踊り場の曲部でステップの境を踏まないよ う注意を与えるために、ステップ下に照明を配置した。

(12) 落下防止デッキ

乗客が手荷物などをデッキ上に乗せ、誤って滑べらせたとき、加速落下するのを防止するストッパを設けた。

(13) 上下部連絡用インターホン

緊急通報用及び保守時の連絡用にインターホンを上下部に 設けた。

6. 試 乗 結 果

超高揚程エスカレーターを踊り場付きとしたことによる心理的効果は予想以上に大きいものであった。特に上部から臨んだ際(図15に実際の様子を写真で示す。)の不安感解消に有効と利用者の方々に好評である。約100名の方による試乗アンケートを実施したところ、87%の人が不安感の緩和に効果があると回答しており、また92%の人が2台を乗り継ぐより好ましいという回答結果が得られている。

7. む す び

以上述べたように、今回開発した中間踊り場付きエスカレーターは超高揚程化に対する不安感解消など心理的問題の解決策として大きな成果を収めることができた。

また、中間踊り場付きのエスカレーターは今回のような超高揚程の領域のみならず、標準エスカレーターの領域においても当社が既に開発実用化したスパイラルエスカレーター (2)と並び、そのユニークなデザインにより、新たなアメニティを提供できるものと大いに期待している。

参考文献

- (1) 鬼頭勝巳, 松倉欣孝, 後藤 茂:三菱モジュラーエスカ レータ, 三菱電機技報, **53**, No. 8, 618~622 (1979)
- (2) 後藤 茂, 中谷 博, 開田豊広, 富所 誠, 斉藤良一: 三菱スパイラルエスカレーター, 三菱電機技報, **58**, No. 12, 848~852 (1984)

90mm 書換え形光ディスク装置

中根和彦* 小川雅晴* 小倉 学* 吉本恭輔* 清瀬泰広* 古川輝雄**

1. まえがき

近年のパーソナル コンピュータ (パソコン) の進歩には、 目覚ましいものがある。演算速度の高速化と処理機能の高度 化は、パソコン誕生以来衰えることなく続いている。その中 心である CPU とメモリは、LSI の設計・製造技術の進歩に のって今後当分の間現在のペースで進歩することは確実と見 られ、これを搭載するパソコンも同じように高性能化してい くと考えられる。また、ソフトウェア側も OS・アプリケー ション共に、ハードウェア側の進歩と競い合いつつ、互いを 最大限に生かすように進化し、よりユーザーフレンドリーで、 処理機能の高い利用環境を提供しつつある。

これとともに、パソコンシステムの外部記憶装置に対する 大容量化・アクセス高速化・小型化・信頼性向上といった要 請は強まるばかりである。最近では、ハードディスク装置の 使用が一般的になり、容量・アクセス速度面で進歩が見られ るが、耐衝撃信頼性での不安は解消されておらず、一般ユー ザーへの普及につれて、かえって強まってさえいる。また、 データやソフトウェアを収容したり、流通させたりするため に不可欠な可換型媒体用として容量を上げてきたフロッピー ディスク装置も、容量がソフトウェアの大規模化に追いつい ていないほか、アクセス速度・データの長期信頼性等の点で もシステム側の要求を満足させてはいない。

光ディスク装置がコンピュータ用大容量メモリとして、ディスク直径130 mm の追記形で初めて市場に出てから約4年、130 mm 書換え形が出てから約3年になる(当社も同時期に発表している⁽¹⁾。)。この間、ユーザーは徐々に光ディスク装置の利用になじんでおり、両面600Mバイトの容量・データ信頼性・速度面で評価されているが、装置やディスクの価格・サイズ・互換性などがまだ十分でなく、広く普及するに至っていない。

一方,90 mm 光ディスクの仕様が,ISO 規格案の審議を経て決定される段階へきた。3.5 インチのフロッピーディスク並のコンパクトなカートリッジに127 M バイト入る大容量ディスクであり、光ディスクを利用しやすい形で提供するものとして期待されている。今回ここに紹介する90 mm 光ディスク装置は、ISO 規格に準拠した光ディスク用のドライブである。パソコンの高性能外部記憶装置としての用途に対象を絞り、そこに求められる必す(須)条件から、"小型軽量"、"安価"、"高速"、"高信頼性"、"省電力"、"ISO 規格準拠

(互換性)", "光 ROM ディスク使用可能"の 7 点に注目し、製品の基本コンセプトとして開発を進めてきた。

本稿では、開発された90 mm 光ディスク装置の特長、及び開発途上で検討して解決した主要な技術課題について述べる。

2. 90 mm 光ディスク装置の特長

開発した90mm 光ディスク装置は、次のような特長を備えている。

- (1) 3.5インチのハーフハイトサイズ (幅101.6×高さ41.3 ×奥行146.0 (mm)) の装置内に、SCSI (Small Computer System Interface) を含むディスクコントローラを内蔵した。
- (2) ホストインタフェースに、今後コンピュータシステムの 標準的なインタフェースになると見られている SCSI-2 規格 を採用した。
- (3) 対ホスト間は, 5.3 M バイト/秒 (最大) の高速データ 転送が可能である。
- (4) 高回転数3,000 r/min 対応の光ヘッド・サーボ系の開発により、7.25 M bps での高速記録再生が可能になった。
- (5) 可動部の軽量な分離形光ヘッドと高推力リニアモータの 開発により、平均シーク時間 42 ms、回転待ち時間・SCSI オーバヘッドを含めた平均アクセス時間 55 ms の高速アクセスが可能になった。
- (6) 動作時の耐振性能を4.9m/s² {0.5G} まで向上させた。
- (7) 光磁気ディスクの他に、光ROMディスク(フルROM、パーシャルROM)も使用でき、ISO 規格に準拠したすべての種類の光ディスクに対応可能である。
- (8) 動作時に平均10W以下の低消費電力で、かつ、自動パワーセーブ機能も内蔵した。

この90mm 光ディスク装置の主要仕様を表1に、外観を図1に示す。装置全体のブロック構成を図2に示す。装置は機能上、ホストコンピュータとのインタフェースを制御するODC (Optical Disk Controller) 部と、ディスクの駆動やアクセスを制御するODD (Optical Disk Drive) 部から成る。以下に、各部の構成と特長を述べる。

3. ODC 部の構成と特長

3.1 ドライブ内蔵型 ODC

LSI の統合・小型化と高密度アセンブリ技術によって回路 系を小型化し、ハーフハイトサイズで ODC の内蔵化を実現 した。従来の光ディスク装置では、ホストに接続された1台のコントローラで複数台のドライブを制御する方式をとっていた。この方式では、ODC と ODD を別個に構成し、その間をインタフェースで接続することが必要になる。この装置では、ODC と ODD を 1 対 1 の構成に限定し、一体化することによって不要なインタフェースを省き、回路規模と処理の複雑さを簡略化することができた。

ODC は、MCU (Micro Control Unit), 誤り訂正 LSI, 変 復調 LSI, 及びプログラムとトラックバッファ用の ROM・

表1.90mm 光ディスク装置の主要仕様

項目	仕 様
ディスク規格	ISO/ANSI(ドラフト)準拠
記憶容量、セクタ長	127Mバイト/枚,512バイト/セクタ
ユーザートラック数 (欠陥管理領域を含む。)	10,000本
ホストインタフェース	SCSI-2, SCSI-1, SASI
コントローラ	装置内蔵
データ転送速度(SCSI 同期転送)	5.3Mバイト/秒(最大)
データ転送速度(SCSI 非同期転送)	2.5Mバイト/秒
データ転送速度(ディスク上)	7.25Mbps
ディスク回転数	3,000r/min
平均アクセス時間(SCSI上)	55ms
平均シーク時間(ディスク上)	42ms
エラー訂正方式	RS/LDC
ビットエラーレート(誤り訂正後)	10 ⁻¹² 以下
シークエラーレート	10-6以下
使用電源,消費電力	+5V/+12V, 10W
寸法(H+W+D), 質量	41.3×101.6×146.0(mm), 600g

RAM に集約された。MCU には、SCSI コントローラを内蔵した新規開発の16 ビット マイクロコントローラ M 35701 を使用した。1 チップで ODC 部・ODD 部を含めて、光ディスク装置全体を制御している。

3.2 ホストインタフェースとキャッシュ機能

SCSI インタフェースは、光ディスク用のコマンドセットを規定している SCSI-2 にも対応した。また、複数のホストがこの装置を共有しても使い勝手が落ちないようにするため、SCSI-2 の拡張機能の中から、コマンドキューイング機能を採用した。最大7台のホストから、ホスト1台当たり10個までのコマンドを受信できる。SCSI-2は、光ディスク装置のほか、CD-ROM・プリンタ・イメージリーダなどの各種デバイスに対応してコマンドセットを規定しており、今後パ

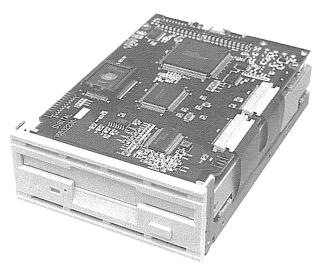


図1.90mm 光ディスク装置の外観

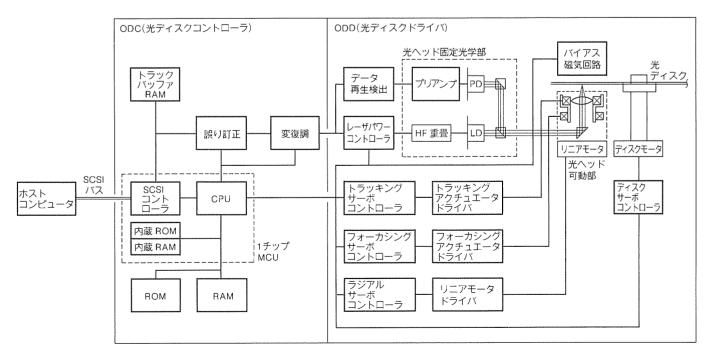


図2.90mm 光ディスク装置全体のブロック構成

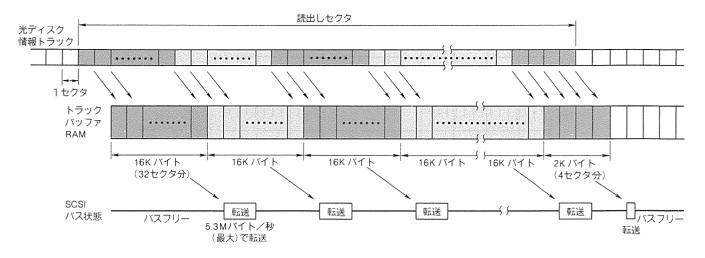


図3、大量データ転送時の SCSI バスタイミング

ーソナル コンピュータ・エンジニアリング ワークステーションなどのコンピュータシステムで標準的なインタフェースになると見られている。

対ホスト間の転送レートは、同期転送の場合で 1.6~5.3 M バイト/秒まで 8 通りに設定可能、非同期転送の場合で 2.5 M バイト/秒まで対応可能である。また、この装置では SCSI-1・SASI にも互換を保っており、ショートピンで SCSI のレベル設定を切り替えることができる。

また、ドライブ上には、高転送レートを生かす ために、128 K バイトの大容量トラックバッファ を搭載している。先読みキャッシュ機能も持たせ ており、大量のデータを扱うときや、一定範囲内

を頻繁にアクセスするときなどはトラックバッファから応答でき、特に高速応答性を生かすことができる。図3に大量データ転送時のタイミングチャートを示す。データは16Kバイト単位でバースト的に転送処理がなされる。

3.3 誤り訂正機能

誤り訂正回路には、従来4チップ必要であった部分を1チップにまとめた新規開発の誤り訂正LSI M 64400⁽²⁾を使用した。チップ内に3セクタ分の誤り訂正用セクタバッファを集積し、セクタごとにバッファをトグルさせながら、リアルタイムで誤り訂正符号化、又は復号・訂正処理を行う。

訂正モードとして、通常の訂正処理モードのほかに、ディスク欠陥などによる長大誤りに対して有効なイレージャ訂正モードも持っており、訂正能力を2倍にした強力な誤り訂正が行える。通常の訂正モードでは1セクタ512バイト中最大40バイトまで、イレージャ訂正モードでは最大80バイトまでの誤りを訂正可能である。

4. ODD 部の構成と特長

4.1 記録再生系の基本性能(3)

高いデータ信頼性を保証するためには、まず、記録再生系

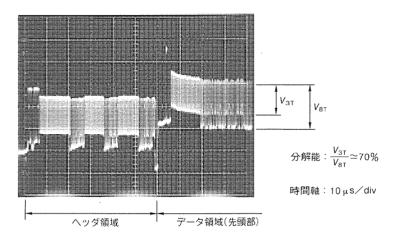


図4. 再生信号波形(プリアンプ出力)

の基本性能の確保が重要である。この装置では、記録時のレーザの駆動制御に、レーザの特性変動を補償して記録パワーを正確に制御できるテストパルス方式を用いた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。また、再生系には、低雑音のプリアンプIC、雑音パルスのマスク機能やディスク欠陥部分の検出機能を備えた再生検出LSIを使用し、誤り発生確率を徹底して低減化させている。

図4にディスク最内周(半径24mm)でのヘッダ,及びデータ領域先頭部の再生波形の観測写真を示す。70%以上の良好な分解能を得ている。また,このときのランダムデータの再生信号ジッタは,2.5 ns 以下であり,検出窓幅34 ns に対して十分な復調マージンが確保できている。

4.2 サーボ系の基本性能⁽³⁾と耐振性能

90 mm 光ディスク装置では、装置の小型化によって可搬性が向上するため、耐振性能の強化が期待される。一方、リニアモータの最大推力は、130 mm 光ディスク装置の半分程度に低下しており、特にトラッキングサーボ系にとって仕様

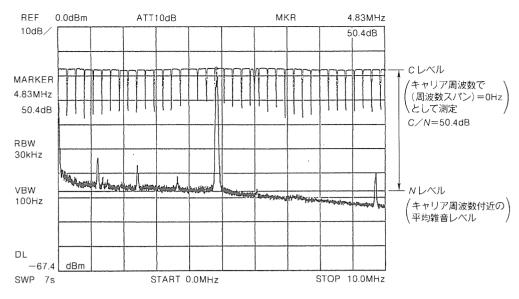


図5. 再生信号スペクトラムと C/N

が厳しくなっている。そこで、従来の2段結合トラッキングサーボ方式 $^{(6)}$ に状態フィードバックを付加し、トラッキングアクチュエータの一次共振周波数 $60~\rm{Hz}$ 付近での外乱抑圧特性を改善した結果、図 $6~\rm{cr}$ に示すように、任意の周波数において $9.8~\rm{m/s^2}$ $\{1~\rm{G}\}$ の外乱振動に対しオフトラック $0.1~\rm{\mu m}$ 以下を実現した。防振ゴムの効果により、 $100~\rm{Hz}$ 以上の振動が、 $-40~\rm{dB/dec}$. で減衰することを考慮すれば、最大オフトラック量は、さらに $1/10~\rm{ck}$ になる。

4.3 高速アクセス性能

光ディスク装置のアクセス性能を向上させる方法は,以下の2通りに大別できる。

- (1) ヘッド可動部の質量を小さくする。
- (2) 極力1回のシーク動作でアクセスを完了し、リトライシーク時間を短縮する。

上記(1)については、装置の小型化に伴い、リニアモータの推力が制限されるため、130 mm 光ディスク装置に使用している一体型光ヘッドと比較して可動部質量を1/3以下に軽量化した分離型光ヘッドを開発した。図7に分離型光ヘッドを含む機構部の外観を示す。

(2)に関しては、130 mm 光ディスク装置でも既に実績のある、外部スケールを使わずに状態推定オブザーバによって光へッドの移動速度を制御し、光スポットを目的トラックに直接位置決めするダイレクトアクセス方式⁽⁷⁾を採用した。この装置では特にトラックカウント能力を強化して横断トラック本数のミスカウントを減らした。図8に、シークスパンとシーク時間との関係を示す。1/3フルストロークのシーク時間はほぼ40 ms (回転待ち時間を除く。)となり、仕様の42 ms を達成している。

4.4 ROM ディスクへの対応

90 mm 光ディスク ISO 規格には、ソフトウェア頒布用などのためにディスクにデータを入れて大量生産できる ROM

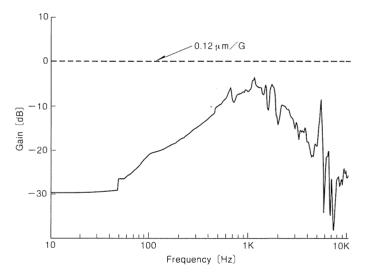


図6.2段結合トラッキングサーボ系の外乱抑圧特性

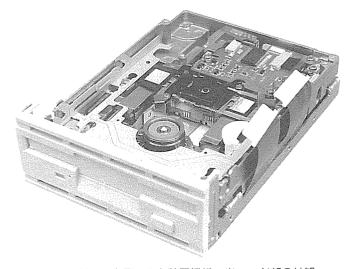


図7.90mm 光ディスク装置機構・光ヘッド部の外観

ディスクや、ROM 領域とリライタブルな光磁気領域を両方持つパーシャル ROM ディスクも規定されている。ユーザーにとって便利な装置にするには、これらの各種ディスクを使

用できるようにすることが必須である。

ディスクの種類により、反射率・信号振幅等のパラメータが大きく異なる。回路系では、これに対応できるように再生信号・サーボ信号の処理方式を構成した。プリアンプ、再生回路・サーボ回路の入力段にそれぞれ利得の切替機能を付加して、コントロールトラック情報及び各種センサ検出結果に従って適応処理を行うようにした。さらに、各回路の自動ゲイン制御機能によってディスクごとに微調整することでダイナミックレンジを拡大した⁽⁸⁾。また、次節に述べる自動調整機能により、ドライブの初期誤差及びディスク特性のばらつきや経年変化による誤差を吸収させ、動作マージンを広げている。

4.5 ドライブの自動調整機能

自動調整の役割は、前節に述べたように広範囲のディスクパラメータやその経時変化に対応すること、及び製造時の調整箇所削減による品質向上とコスト低減である。分離形光へッド方式では、サーボ系にオフセット誤差の要因が増えており、ドライブの信頼性向上のためにも重要な機能である⁽⁹⁾

ディスク起動時に、ディスク全面にわたってサーボ系センサオフセットと再生系ゲインの自動補正を実行する。サーボ信号と再生信号の振幅を測定し、補正アルゴリズムに従って演算し、制御している。この振幅測定と補正処理は、動作中も装置の空き時間を利用して定期的に行っており、回路系の動作マージンの拡大に寄与している。これによって対応可能なディスクパラメータの幅を広げることができた。

また、光磁気ディスクは、記録原理が光熱による磁気記録であることから記録感度が温度に対して敏感であり、最適な記録パワーが−0.03 mW / ℃程度の温度係数を持っている。このため、温度センサをディスク面近傍に配置して温度を監視し、記録時にパワーの温度補正を行って、高品質の信号記録を行えるようにした。

4.6 パワーセーブ機能

消費電力の低減は、電力節約のためだけでなく、 小型化する傾向にあるパソコンの本体内に装置を収 納することを考えると、内部の温度上昇を抑えるた めにも重要な課題である。このため使用する LSI を低消費電力化したほかに、パワーセーブモードを 設けた。

図9に、パワーセーブに関するODDの動作モード間の状態遷移図を示す。ホストから光ディスク装置へアクセスする時間間隔が設定時間を超えると自動的に2段階のパワーセーブモードへ落ちて行く方式を採った。まず、スティル状態からトラッキング系をカットし(セーブ1モード)、次にフォーカシ

ング系・レーザ駆動系・再生系をカットする(セーブ2モード)。さらに、長時間アクセスがない場合などは、ホストからのコマンドによって、ディスク回転も停止してSCSI-CPU系のみを残すこともできる(ストップモード)。

各モード間の遷移時間の設定には、動作復帰に要する時間も考慮して、ユーザーに負担をかけないよう配慮している。図中には標準的な時間設定を示した。この結果、消費電力は表2に示すように、スティル時は8.5 W、パワーセーブ時には各々順に6 W / 2.5 W / 2 W 以下となった。一般のパソコンユーザーがワープロの文書ファイルなどにこの光ディスクドライブを使用している場合、平均消費電力は5 W 程度になるとみられ、平均消費電力を大幅に低減することができる。

5. む す び

以上,今回新たに開発した90 mm 光ディスク装置について紹介した。この装置は、小型磁気ディスクメモリ並のコンパクトなサイズに、これからの高度なパーソナル情報処理環境に求められる大容量・高速度・小型軽量をはじめとする様々な仕様を、初めて満足に組み込んだパソコン用ディスク装置であると考えている。光ディスク装置を利用した便利な

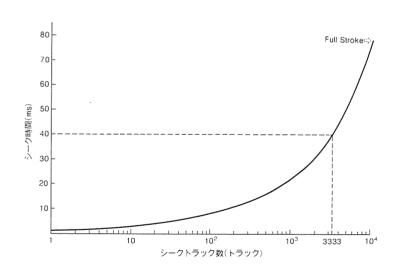


図8.シークトラック本数とシーク時間

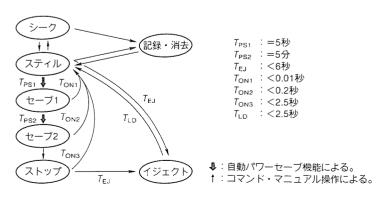


図9. ODD 動作モード間の状態遷移

表 2. 動作モード別の平均消費電力

動作モード	消費電力(W)
シーク	10
記録・消去	9
スティル	8.5
セーブ 1	6
セーブ 2	2.5
ストップ	2
イジェクト	2

環境が普及することを願いつつ, 今後は更に薄型化・高速化・容量拡大等が進むことを念頭において開発を進めていこうと考えている。

なお、この開発に御協力いただいた関係各位に感謝の意を 表す。

参考文献

- (1) 岡田和夫, 服部通宣, 小西直行, 本吉健郎, 山本 哲: 追記型光ディスク装置, 三菱電機技報, **62**, No. 7, 22 ~25 (1988)
- (2) 森 信太郎, 児玉幸夫, 吉田英夫, 井上 徹, 清瀬泰広 : 光ディスク用誤り訂正 LSI, 三菱電機技報, **65**, No.2, 68~73 (1991)
- (3) 田中邦麿, 古川輝雄, 伊藤 修, 久保高啓, 中田正矩:

- 書換え型高性能光記録技術,三菱電機技報,**62**, No.7, 26~29 (1988)
- (4) 吉本恭輔, 伊藤 修:光ディスクにおける記録パワー制 御, 昭和60年度信学会全国大会, 1054
- (5) 中根和彦, 古川輝雄, 島元昌美, 伊藤 修, 田中邦麿, 里 治則, 梅山竹彦, 林 茂男:光ディスク記録再生系 信号処理用 LSI, 昭和63年度応物学会連合講演会, 28 a-ZQ-7
- (6) 小川雅晴, 伊藤 修, 林 茂男, 久保高啓:光ディスクメモリの2段結合サーボ方式, 光メモリシンボジウム'85 論文集, 203~208 (1985)
- (7) 小川雅晴, 仲津啓二, 林 茂男, 伊藤 修, 渡辺勢夫, 田中邦麿:光ディスクメモリの高速アクセス方式, 光メ モリシンポジウム'86 論文集, 191~196 (1986)
- (8) Shimamoto, M., Yamada, K., Watanabe, I., Nakajima, Y., Itoh, O., Tanaka, K.: Interchangeability of Optical Disks, SPIC 1499, 393~400 (1991)
- (9) Yoshimoto, K., Ogawa, M., Itoh, O., Tanaka, K.: Compensation Method of Focusing Servo Offset of Optical Disk Drives, SPIE 1316, 30~34 (1990)
- (10) 吉本恭輔, 伊藤 修, 田中邦麿:光ディスク駆動装置の サーボオフセット補正方式, テレビジョン学会誌, **44**, No. 10, 1398~1402 (1990)

《MELCOM80》オフィスコンピュータ用

"三菱販売情報システム"

菊地 寿* 喜多村重昭* 西崎 亨* 佐藤正昭** 中 俊二***

1. まえがき

コンピュータを導入する近道は、標準ソフトウェア (既製ソフトウェア) を活用することである。しかし、業務の単なる機械化 (OA 化) は、既に実務化されている。これから導入するシステムは、企業の SIS (Strategic Information System:戦略情報システム) を担えるものである必要がある。そのため、標準ソフトウェアに求められる機能は高度化してきている。

一方,システムを開発するシステムエンジニア (SE) の要員は、慢性的に不足している。そのため、システム導入作業の効率化を図ることが課題となっている。

《MELCOM80》オフィスコンピュータ用"三菱販売情報システム"は、これらの市場要求を満たすことを目的として開発した。

本稿では、このシステムの開発のねらい、機能概要、特長を紹介するとともに、導入する際の修正作業(カスタマイズ作業)の省力化手法、《MELCOM80》の戦略型ツールであるEEL (EDUET & Excel (注1) LINKAGE) を活用した戦略情報システムについて紹介する。

2. 開発のねらい

2.1 "販売管理システム"から"販売情報システム"へ

今までは、販売業務を支援するシステムは、得意先・仕入 先との取引が正確に行えるものであればよかった。つまり、 販売業務を管理するシステム"販売管理システム"であった。

しかし、現在、顧客ニーズの多様化、ジャスト イン タイムの物流の一般化、顧客囲い込みの激化など、販売業を取り巻く環境は、ますます厳しくなってきている。そのため、企業内の情報も、全体が見渡すことができ、いつでも情報を取り出せ、経営の変化、顧客のニーズに、即、対応できる必要がある。

したがって、システムとしては、販売業務で発生する受注から代金回収までの情報や、発注から支払までの情報が一元管理でき、また、タイムリーに必要な情報を取り出せるものでなければならない。これが、"販売情報システム"である。このシステムでは、その要求を満たすために、次の機能を実現している。

(注1) "Excel"(エクセル)は、マイクロソフト社の登録商標である。

- (1) 受注から代金回収までの情報を一元管理した販売情報データベースの構築
- (2) 受発注時の受発注残数や入出荷による在庫数などをリアルタイムに更新
- (3) 商品, 得意先別の分析ができるような実績情報管理
- (4) タイムリーに情報が照会できるように照会機能の充実

2.2 適用性の向上

一言で販売業務といっても、その業務形態は、業種・業態・企業ごとによって様々である。よって、標準的なシステムを一つ用意しておいても、そのまま利用されることは、ほとんどないと言っても過言ではない。

このシステムは数多くの企業で利用していただくために, 次のような機能を準備している。

- (1) ある企業では、"在庫管理は使わない。"また、ある企業では、"仕入管理は使わない。"等の要望にこたえるために、業務のサブシステム化を図り、段階的導入を可能とする。
- (2) "受注即出荷即売上げ"といった業務処理の企業もあれば、"受注・出荷・売上げ"と商談サイクルの長い企業もある。そのため、業務形態に合わせた処理パターンの選択を可能とする。
- (3) "日付の使い方が、西暦か和暦か"とか"商品の数量単位が、整数のもの小数のもの"でも、コントロール情報の設定で運用制御できる。
- (4) すべてのプログラムで共通して使う機能を部品化させることにより、適用作業時の修正箇所を最小限に抑えることができる。

これらの機能は、併せて、システム稼働作業を担当する SEの作業量を削減する効果も担っている。

2.3 《MELCOM 80》の最先端技術の採用

三菱オフィスコンピュータ《MELCOM80》には、次の優れた機能やツールが用意されている。このシステムでは、これらの機能を有機的に活用して、《MELCOM80》アプリケーション ソフトウェアとしては、最先端のシステムを実現している(図1)。

- (1) データベース処理やソート処理の高速化が可能となる, 世界初のリレーショナル データベース プロセッサ "G REO" (グレオ)
- (2) リレーショナル データベースが簡単に操作できる第四 世代言語 "EDUET"
- (3) 端末利用者が自分で簡単にオフコンのデータをグラフ化

することができる、AX パソコン《MAXY》上のOA ソフト "Excel" と《MELCOM 80》上の"EDUET" を連動させた"EEL" 機能

- (4) 得意先ごとに異なる伝票フォームにも自由に印刷できる "指定伝票発行システム"
- (5) 企業内の財務会計や管理会計が行える"会計情報システム mk II"
- (6) 画面・帳票設計を支援したり、設計情報からソースプログラム生成などが行えるシステム総合開発支援ソフトウェア "PRODUCE"

3. システムの機能概要

このシステムは、**図2**に示す7つのシステム、又はサブシステム機能から構成されている。

(1) 売上・売掛システム機能

売上管理や得意先への請求や売掛管理などを行うための, 売上入力や入金入力,売上伝票や請求書の発行,入金予定表 や得意先元帳の作成,及び各種の売上照会などの機能を備え ている。

(2) 仕入・買掛システム機能 仕入管理や仕入先への支払や 買掛管理などを行うための, 仕 入入力や支払入力, 仕入実績表 や支払予定表, 仕入先元帳の作 成, 及び各種の仕入照会などの 機能を備えている。

(3) 在庫システム機能

倉庫の入出庫や棚卸業務を行うための,入出庫入力や棚卸入力,商品元帳や棚卸差異表の作成,及び在庫照会などの機能を備えている。

(4) 受注サブシステム機能

受注処理や出荷業務を行うための,受注入力,出荷入力や売上確定入力,出荷指図書や納品書の発行,受注管理表や受注残一覧表の作成,及び各種の受注照会などの機能を備えている。

(5) 発注サブシステム機能

発注処理や入荷業務を行うための,発注入力,入荷入力や仕入確定入力,発注管理表や発注残一覧表の作成,及び各種の発注照会などの機能を備えている。

(6) 販売情報分析サブシステム 機能 図3に示すように、受注から回収までに発生する売上情報 や、仕入・在庫等の情報は、販売情報データベースとして一 元管理される。

このデータベースを用いて、売上げ・仕入・商品などに関する分析を行うための、売上げ・粗利対比表や推移表、売上達成表や売上数量予測表、及び ABC 分析表などの作成機能を備えている。

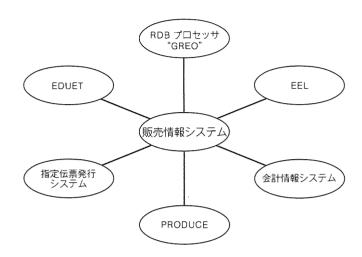


図1. 最先端技術を活用した販売情報システム

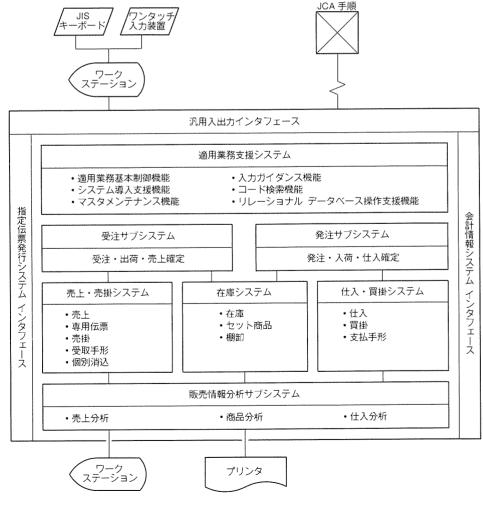


図2.システム構成

(7) 適用業務支援システム機能

システムの導入や、導入後の運用管理を支援する機能、及 びオペレータの操作を支援するための、商品・得意先コード 等のコード検索機能や、データの入力の仕方を解説した入力 ガイダンス機能などを備えている。

また、リレーショナル データベースの操作を支援する機能も備えている。

4. システムの特長

このシステムは、主に次のような特長を持っている。

(1) 導入する企業の業務形態に合わせた柔軟な対応が可能 導入したい企業の業務内容に応じて、"受注・売上システ

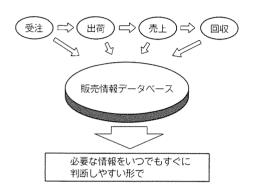


図3. 販売情報データベース

ム", "発注・仕入システム" 及び"在庫システム"というように, 段階的なシステムの導入が可能である。

また、企業の様々な受注から売上計上までの業務形態に応じるため、図4のような四つのパターンから選択できるように設計されている。同様に、発注から仕入計上までの業務形態についても、選択できるように設計されている。

このように、導入したい企業に最適なシステムを短期間に 構築し、導入することが可能である。

(2) 操作ガイダンスやコード検索機能による対話方式で、確実な操作が可能

図5のような操作により、ファンクションキーの操作方法 や入力する項目の意味合い等を説明した"操作ガイダンス" を表示したり、商品コードや得意先コードが分からなくても、 読み仮名やコードの一部を入力することにより、コードを一

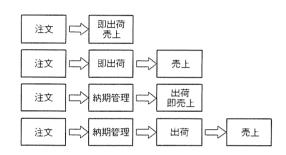


図4. 受注処理のパターン



図5.操作ガイダンスとコード検索機能

覧表示する"コード検索"の機能を備えている。

これらの機能により、だれにでも操作ができ、かつ運用ミスや操作エラーを防ぐことができる。

(3) 在庫数量はリアル更新を行い、いつでも"いま"の状況を見ることが可能

商品の入荷・出荷に伴う在庫情報は、リアルに更新する方式を実現しており、いつでも"いま"の在庫情報の照会が可能である。また、受発注の情報と合わせれば、出荷・入荷の納期管理や在庫予測が行え、適正な在庫管理が可能となる。

その上,**図6**のように,受注入力などの入力画面でも現在数がいつでも確認できるので,在庫不足の場合でもすぐに次のアクションを起こすことが可能である。

(4) 販売情報データベースを EEL で活用することにより, いつでも最新の販売情報分析が可能

販売情報データベースに対応した各種ファイル定義体を用意している。

新たな情報分析を行いたい場合は、このファイル定義体を用いて、さらにEDUETやEELにより、必要な分析資料をタイムリーに、かつグラフ表示などの見やすい形で、簡単に作成することができる(図7)。

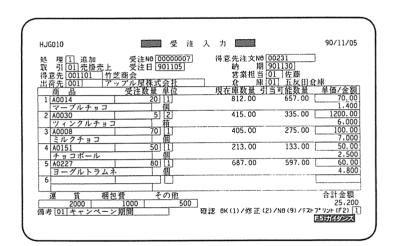


図6. 入力画面例(受注入力)

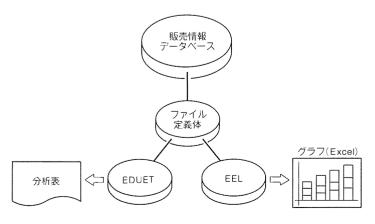


図7. EDUET/EELの活用

これにより、企業の経営戦略に合った分析システムを独自 に運用することができる。

(5) 会計情報システムや EOS システム等の連動により、企業トータルシステムへの発展も可能

販売情報システムで発生したデータの中で経理で必要なデータは、会計情報システム mk Ⅱへ受け渡すことが可能である。

また、オンラインで受注する EOS システム (Electric Ordering System) との連動なども可能である。

これらの他システムとの連動機能により,企業トータルシステムへの発展が容易に実現できる。

5. PRODUCE によるカスタマイズ省力化

このシステムは、一般的な販売業務をシステム化したものであるため、業種や企業によっては、システムの修正が必要となる。その作業を省力化するために、次のドキュメント技術、システム技術を用意している。

5.1 開発基準書による仕様の統一

一般に、ソフトウェアの開発は、**図8**のような手順で開発 作業が行われる。しかし、システム規模が大きくなると、外

> 部仕様設計段階から作業分業がなされる。作業分業 は、システム開発工程を短縮するには有効な手段で あるが、反面、次のような問題が生じることになる。

- (1) 入力画面や帳票レイアウトに統一性がない。
- (2) 操作方法に統一性がない。
- (3) 各仕様書の記述方式が異なり、記述者以外は理解しにくい。
- (4) プログラミングの方式が異なり、そのプログラムをプログラミングしたプログラマ以外は、プログラムを解読しにくい。

これでは、このシステムを開発した者以外は、シ

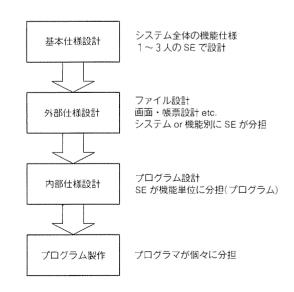


図8.システム開発の手順(通常)

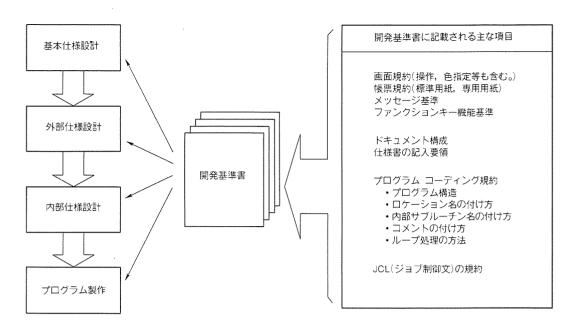


図9. 開発基準書利用のシステム開発

ステム修正することが事実上不可能となってしまう。 そのため、図9のような開発基準書を事前作成した上で開発作業を行った。これにより、各開発担当 者間で仕様のルール化が図られ、前述した問題を解 消することができる。さらに、このシステムを第三 者が理解する場合、まず、この開発基準書を理解す ることにより、システム習得を早めることが可能と なる。

5.2 PRODUCE 活用の効果

図10のような PRODUCE の活用は、次のような 効果を生むことができる。

- (1) PRODUCE によって設計されたファイルや画面・帳票レイアウトからソースプログラムが生成されるため、プログラマ生産性の向上及びプログラム品質の向上が図れる。
- (2) PRODUCE によって設計されたファイルや画面・帳票 レイアウトは部品として活用でき、一部修正して新規プログ ラムに流用することができる。
- (3) システムの一部を修正しても、すぐに仕様書として出力できるので、ソフトウェアと仕様書の同期が常にとれる。

6. EELによる戦略情報対応

6.1 EEL の活用方法

経営者が顧客のニーズ、商品のトレンド等を分析するには、 販売業務で発生した情報から分析する必要がある。

しかし、コンピュータ上のシステムでは、処理性能の問題 等から、発生時点の生データを保存せず、その都度、集計加 工したデータとなってしまっているのが普通である。集計加 工されたデータは定例的な資料として出力されるが、その他 の目的に活用しようとした場合、情報の不足が発生して、思

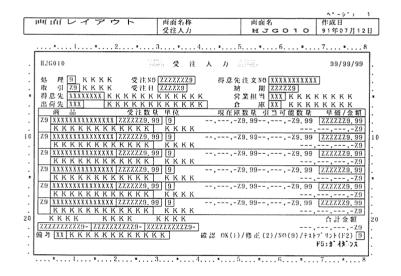


図10. PRODUCE による画面設計例

っていた資料が得られないことが多い。仮に、生データが保存されていたとしても、それを利用できる有効なソフトウェア (情報を取り出すまでの時間を含めて)がないのが常である。

このシステムでは、販売で発生した生データを最大5年間 保存できる機能を持っている。

このデータをデータベースとして構築して、第四世代言語 "EDUET"で、必要な項目を必要な選択条件でデータ抽出・ 集計を行い、さらに EEL 機能によって AX パソコン《MAX Y》にデータを送り、OA ソフト《Excel》によって、グラフに することができる(図11)。

データの活用方法によっては、月単位の分析はもとより、 図12のような日単位の分析や、時間単位の分析まで可能と なる。

6.2 タイムリーな資料の提供

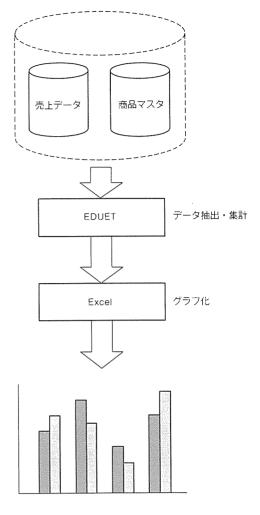


図11. EEL の活用方法

様々な分析が可能となっても、資料がタイムリーに提供されなければ、経営者の意志決定には役に立たない。

タイムリーに出ない理由は二つ考えられる。第一は、コンピュータが日常業務処理で手一杯で、分析処理を行う余裕がない。仮にあったとしても処理時間がかかりすぎる。第二の理由は、いかに操作が簡単な"EDUET"、"Excel"といえども、使える人が限られて、その人に仕事が集中する。

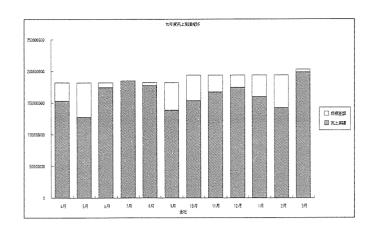


図12. EEL によるグラフ(例)

《MELCOM80》では,これらの問題を次の機能で解決している。

- (1) リレーショナル データベース プロセッサ "GREO" により、CPU 処理負荷を軽減するとともに、高速処理を実現している。
- (2) CD 装置によるナレーション解説と連動した実戦的学習 支援システム "GRADE UP" により、だれもが"EDUET"、 "Excel" を覚えて、操作することができるようになる。

7. む す び

《MELCOM80》"三菱販売情報システム"は、企業の販売 業務を支援するだけでなく、企業のSIS の構築の一翼を担 うことを主目的としている。

しかし、このシステムに本当に期待したいことは、《MEL COM80》上でアプリケーション システムの設計を担当されている SE の方々が、このシステムを活用して SE 作業の生産性向上を図るとともに、各 SE がある業種向けに適用したシステムを SE 間で流通させて、システムノウハウの有効活用を図ることである。今後は、そのための普及教育や適用時の SE 支援を行う所存である。

家庭用燃焼器の低 NOx 化

相本照男* 小関秀規* 佐藤 稔* 矢嶋大三** 小木曽明男***

1. まえがき

近年、大都市圏では大気汚染がますます深刻化してきてい る。環境庁大気保全局等では環境問題が取り上げられ、環境 保全技術の動向把握(1)や大気汚染物質の排出濃度規制の動 きが活発化している。このような状況下, 燃焼機器からの NO_x 排出濃度に対しても規制強化の動き (2) が見られ、大気 汚染への寄与は小さいものの、家庭用燃焼器でも積極的な環 境への配慮が必要とされている。燃焼機器メーカー等からな る(社)ガス石油機器工業会では、現行のNOx排出濃度の実 態把握や NO_x 排出濃度の測定法, NO_x 排出濃度基準値の設 定等活発な活動が行われてきている。また、石油燃焼器及び ガス燃焼器に対して, 西暦 2000 年の NO_x 排出濃度目標平均 値をそれぞれ90 ppm, 60 ppm $(O_2 = 0 \% 換算)$ と定めて, 1991年から順次低 NOx 化を図り、自主的な環境保全への取 組を行いつつある。

以上の動向を踏まえ、当社では従来機種の NO_x 排出濃度 を低減し、暖房空間のみならず、地域環境、都市環境の健全 性・快適性に寄与すべく低 NOx 化の検討を行ってきた。本 稿では、当社の家庭用暖房機である石油ファンヒーター、 《クリーンヒーター》でふく射体及び二段燃焼による低 NOv 化を検討し、現行機種のNOx排出濃度を30~40%低減でき る低 NOx 燃焼器を開発、製品化したのでその概要を解説す る。

2. NO_x の生成機構及び低減法

2.1 NO_X の生成機構

一般に燃焼器から排出される NOx としてはそのほとんど が NO と NO₂ であり、NO₂ は NO の一部が更に酸化されて 生ずる。NOとNO2の割合は燃焼方法や燃焼器に依存する が、それらの合計である NOx は割合が変わっても一定であ る。一方, 近年 N₂O がクローズアップされてきているが. これは窒素含有量の多い石炭などの燃料を用いた場合に多く 発生する(3)ため、家庭用燃焼器ではNOとNO。だけについ て考えれば十分である。

NO の生成はその反応機構により、図1のように分類され

- (1) thermal NO…空気中の N₂ の酸化反応によって生じる もの。
- (2) fuel NO…燃料中のN化合物によって生じるもの。

家庭用の燃料である都市ガスや LPG、灯油などは N 分含 有率が極めて低いので(2)の fuel NO は無視でき、これらの 燃料を燃焼させる場合には(1)の反応経路のみを考えればよ い。この thermal NO の生成機構としては、次の二つが明ら かにされている。

(a) Zeldovich NO

燃料の酸化反応に比べて極めて遅い図1の(1)~(3)の素 反応によって生成される。この生成機構の特徴としては、 ①温度依存性が大きい、②O2濃度が高いほど生成される、 ③高温域での滞留時間が長いほど生成される、などが挙 げられる。

(b) prompt NO

一次火炎帯において図1の(4)のような反応経路によっ て急激に生成される。この生成機構の特徴としては、① 温度依存性が小さい、②燃料過剰側での生成が著しい、 ③反応速度が非常に速い、などが挙げられる。

これらの生成機構によって燃焼器から排出される各 NO の 割合と、それらの和である NOx を一次空気比に対して模式 的に表したのが図2であり、一次空気比の値によって主な NO 生成の機構が異なることが分かる。

NO2は燃焼によって生成した NO が更に酸化したものであ り、NO を含む高温燃焼ガスが周囲空気と混合する際に生じ ると考えられている。この NO→NO₂変換の主要な反応は 図1の(5)の反応と言われており、この場合 HO_2 化学種が重 要な役割を果たしている。

2.2 NO_x 低減法

2.1節で述べたように、燃焼器から排出される NOx を低 減するためには、NOの生成を抑制することが必要で、この NO 低減の原理としては、

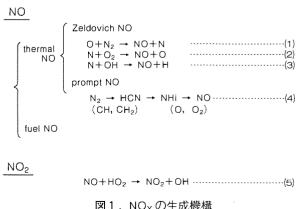


図1.NO_Xの生成機構

- (1) 火炎温度の低下
- (2) 燃焼域での O2濃度の低減
- (3) 高温域での滞留時間の減少
- (4) NO 生成素反応の除去

がある。民生用の燃焼機器では工業炉等で用いられている大がかりな脱硝装置の使用は不適であり、比較的簡便な手段で NO_X を低減する必要がある。民生用で考えられる具体的なNO 低減の方法としては主に以下が挙げられ、それらを表1にまとめた。

(1) ふく射体の挿入

火炎中に挿入したふく射体から熱を放射させることで火炎 温度を低下させる方法。

(2) 二段燃焼

一段目では空気比を1以下にし、火炎温度を低く保って燃焼させ、二段目で不足分の空気を導入して比較的緩やかに完全燃焼をさせる方法。

(3) 表面燃焼(シュバンクバーナ,メッシュバーナ)

火炎をバーナ表面に近接して形成し、火炎からバーナへの 熱移動を増加させて燃焼熱を固体ふく射の形で周囲に放熱す ることにより、火炎温度を低下させる方法。

(4) 高空気比燃焼(全一次燃焼)

予混合空気量の増大に伴って火炎温度が低下することを利 用する方法。

(5) サーマルクエンチ

給湯器を対象にした方法であり、燃焼室内の熱交換器によって燃焼ガス温度を直ちに低下させる方法。

(6) 燃焼排ガス再循環

既燃焼ガスの一部を未燃混合気に導入し、火炎温度と O_2 濃度とを低下させることを利用する方法。

(7) 触媒燃焼

触媒燃焼の反応過程ではNOを生成する素反応を含まず、 また比較的低い温度で燃焼反応(酸化反応)が完結すること を利用する方法。NO_x生成が極めて少ない。

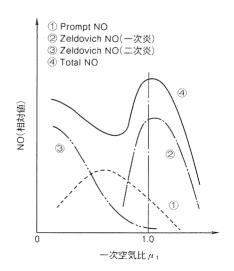


図2. 一次空気比による NO の生成割合

表1. NOx 低減の原理とその手段

NO _x 低減の原理		火炎温度の低下	高温滞留時間の短縮	02 濃度の低下	10 生成素反応の排除
	ふく射体挿入	0			
対	二段燃焼	0		0	
-	表面燃焼方式	0			
策	高空気比方式	0			
手	サーマルクエンチ		0		
段	燃焼排ガス再循環	0		0	
	触媒燃焼方式				0

以上のように NO_x 低減の手段としては幾つか考えられるが,通常,燃焼器では NO_x を低下させると一酸化炭素 (CO) が増加し,CO を抑えると NO_x は高い排出レベルとなる状況に陥りやすい。このように NO_x と CO はいわゆるトレードオフの関係にあるため,CO 排出の増加しない NO_x 低減策を創出することが重要なポイントとなっている。

3. 石油ファンヒーターの低 NOx 化

家庭用燃焼器である石油ファンヒーターでは、過度な価格 上昇につながる低 NOx 対策は採用しにくい。そこで簡便な 方法で効果のあるふく射体挿入による低 NOv 化を検討した。 ふく射体挿入による低 NOx 化は 2 章で述べたように、火炎 中に設置したふく射体からの放射伝熱によって燃焼熱を放熱 し、火炎温度を低下して NOx の低減を図るものである。ふ く射体の挿入位置としては、一次火炎内と二次火炎内とに分 けられる。ところで燃料である灯油は N 分をほとんど含ま ないため、生成される NOx は燃焼用空気中の窒素からの thermal NO が主体である。また、現行バーナは部分予混合 方式であるため、thermal NO の中でも prompt NO が支配 的である。したがって、 prompt NO の生成する一次火炎中 にふく射体を挿入することが効果的であるが、この場合には CO の多量排出やバーナ温度の過上昇、ふく射体自身の酸化 劣化といった問題が生じる。特に開放型の暖房機であるファ ンヒーターは燃焼排ガスを室内に直接放出するため CO の排 出は極めて少なくすることが重要である。そこで筆者らは燃 料過濃な燃焼条件では二次燃焼でも NO_x が生成する⁽⁴⁾こ とに注目し、二次火炎中にふく射体を挿入する方法を選択し た。それによる低 NOx 化を以下に説明する。

当社の石油ファンヒーターにはデラックスタイプに搭載している AJB (Air Jet Burner) 方式 $^{(5)}$, コンパクトタイプに搭載している気化管式のCCV (Clean Compact Vertical) 方式 $^{(6)}$ との 2 種類の燃焼器を採用している。ここでは AJB 方式の石油ファンヒーターを低 NO_X 化の例として述べるが,

CCV バーナでも効果は同様である。

図3は当社 AJB 方式のバーナの構造を示したものである。ノズル部の高速空気噴流で微粒化された灯油は高温 (約300℃) に保持された気化筒の内壁で気化する。その後、空気と混合して混合促進板 (D. P) を通過する際に濃度の均一な予混合気となり、バーナヘッド上で燃焼する。バーナヘッドには円形の炎孔が設けられた母材の外周に金属メッシュが巻かれており、この炎孔部のメッシュ外表面に一次火炎が、そしてその後流に二次火炎が形成される。バーナ

ヘッドの外側には、二次火炎が広がって燃焼室内壁に接触するのを防ぐために保炎リングが設置されている。

今回の方法は、従来からあるこの保炎リングを大型化して ふく射体としての機能を積極的に利用し、二次火炎の冷却効果を大きくして火炎温度を低下し、Zeldovich NO を低減させるものである。この方法による NOx の低減は、図4のように考えることができる。図は燃焼ガスの流線に沿って NO 生成を模式的に表したもので、部分予混合火炎の NO は一次火炎と二次火炎近傍の位置で主に生成する。ふく射体がない場合は図中 A の曲線で表されるが、ふく射体を二次火炎又は一次火炎と二次火炎との間に挿入した場合には、その間で燃焼ガス温度が下がるため曲線 B のように NO 生成が低減される。そこでは図1の(3)の反応が抑制されているものと考えられる。

この大型の保炎リングを製品に適用するに際しては、保炎リングの高さや径などを種々変化させ、排ガス (NO_x, CO)特性及び各部の温度測定を行い、その形状の最適化を図っている。単純に保炎リングを高くしただけでは低 NO_x 効果はあるものの、CO の排出が増加しバーナヘッドの温度も上昇してしまう。そこで図3のように保炎リングをテーパ状に広げる形で径を大きくし、一次火炎と適度な距離を確保することで、燃焼熱を逃がしつつ CO 排出量及びバーナヘッド温度の過上昇を抑制した。この最適形状の大型保炎リングを搭載したファンヒーターの排ガス特性を図5に示す。大型保炎リングの採用により、CO の排出を増加させることなく約30%の低 NO_x 化が達成された。

さらに、安全性の確保には細心の注意を払っている。特に CO の排出に対しては、通常の運転条件だけでなく CO が多 量に排出されやすい条件まで想定して試験している。例えば、 燃焼によって室内の酸素濃度が低下した場合やホコリ詰まり によって燃焼用空気量が減少した場合である。このような使 用条件でもこの大型保炎リングを用いた低 NO_x バーナは、

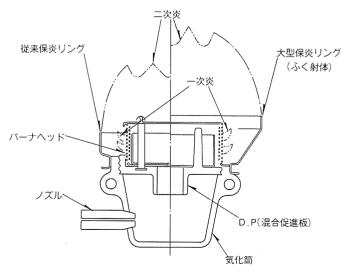


図3. AJB 方式のバーナ構造

CO 排出量が数 ppm と従来製品と同程度であることを確認している。

NO₂に関しては**2章**でも述べたように、NO を含む高温ガスが空気と混合する際に生じると考えられるため、保炎リング近傍だけでなくその後流側での二次空気の流れも重要である。したがって、大型保炎リングだけの NO₂の低減効果を従来のリングと比較することは難しいが、NO₂の値も図5のように従来製品と同程度である。また、大型保炎リングは図3のようにバーナヘッド全体を高温のリングで囲む構造になっているため、消火時にわずかに残った未燃ガスを燃やし尽くすことができ、においの低減という複合効果も持っている。平成3年度の石油ファンヒーターは、この大型保炎リング

平成3年度の石油ファンヒーターは、この大型保炎リングを搭載して低NOx化を実現した製品となっている。その外観(KD-336DS)を図6に示す。この低NOx以外にも平成3年度の製品には、"ニューロ温感コントロール"や"ファジーパワーコントロール"と称するきめ細かな制御を搭載し、一層快適な暖房も提供できるようになっている。また、使用しないときには本体前面の温風吹出し口がかくれるインテリアシャッタを採用しており、すっきりしたデザインになっている。

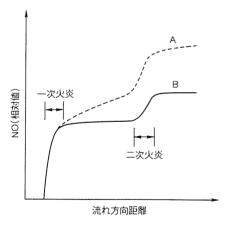


図4.ふく射体挿入による NO 生成の模式

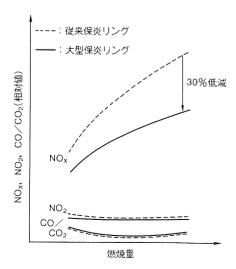


図5. 大型保炎リング搭載の石油ファンヒーターの 排ガス特性

4. 《クリーンヒーター》の低 NO_x 化

《クリーンヒーター》は、強制給排気式の暖房機(FF式暖房機)で本体内部に燃焼ガスと室内空気との熱交換器を備えており、燃焼ガスを室外に放出する密閉タイプの燃焼器を搭載している。したがって、前章の開放型の石油ファンヒーターと同じ方法での低NOx化は適用しにくいが、《クリーンヒーター》も家庭用燃焼器であることから価格など経済性を重視し、今回は二段燃焼による低NOx化の方法を選択した。二段燃焼による低NOxの方法は、一般に燃焼を完結させるために比較的大きな燃焼空間を要し、石炭や重油などN分の多い燃料を使用する大型の加熱炉で主に採用されている。《クリーンヒーター》では燃焼空間と熱交換器を兼ねた燃焼筒を持っており、コンパクトながら二段燃焼を採用するのに適

した構造となっている。

図7にこの二段燃焼法を適用した石油《クリーンヒーター》の燃焼器の構造を示す。動作は石油ファンヒーターの燃焼器とほとんど同じで、ノズルからの一次空気によって微粒化された灯油が気化器内壁で気化・混合し、バーナ炎孔部に一次火炎を形成する。石油《クリーンヒーター》では、バーナへッドはステンレスの積層板を用いており、積層板間の狭いスリットが炎孔となっている。二次空気導入位置は従来(二次空気導入孔~バーナ間距離L=0 の位置)よりも燃焼室下流側に設けられており、燃焼室の周囲から供給する構造となっている。《クリーンヒーター》における二段燃焼では、一段目はこのスリット炎孔上で燃料過濃な比較的低温の予混合燃焼を行わせ、その下流に距離Lをおいて十分な二次空気を導入し、一段目燃焼ガスを冷却して NO の生成を抑制すると同時に二段目で完全燃焼させる構成となっている。

この二段燃焼を用いた石油《クリーンヒーター》の NO_X の排出特性を図8に示す。図は一次空気比をパラメータとして NO_X 排出濃度(相対値、 $O_2=0$ %換算)に及ぼす二次空気導入孔-バーナ間距離Lの影響についての測定結果例である。一次空気比が小さいほど、また距離Lが大きいほど、 NO_X 排出濃度は低下するが、Lがある程度以上になると NO_X の低減効果は飽和することが分かる。

このような二段燃焼における NO の生成は、模式的には**図9**に示すように考えることができる。横軸には流れ方向の距離を採ってあり、上段は燃焼ガス温度の変化を、下段は NO 生成の様子をそれぞれ表している。従来の燃焼器では二次空気導入位置が

一段目燃焼と同じ位置であり、この場合燃焼温度は高くその ため NO の生成も多い (曲線 A)。一方, 二段燃焼で二次空 気位置を下流側にすると(曲線 B. C)、一段目燃焼では火炎 温度はあまり高くならず、周囲への熱損失で燃焼ガス温度は いったん低下する。そして、二次空気の供給による二段目の 燃焼で再び温度は高くなる。この温度変化に伴って、一段目 では一次燃焼による prompt NO の生成はあるが、その量は A の場合より少なく、二段目燃焼で再びthermal NO の生成 はあるもののその間の温度低下によって生成量は少ない。そ の結果、排出される NO_X は A の場合に比べて少なくなる。 二段燃焼で一次空気比が高い場合(B)は prompt NO は少な いが、燃焼温度が比較的高く、そのために Zeldovich NO の 生成寄与が大きく、一次空気比の低い場合(C)に比べて NO_X の排出濃度は高めとなる。また、距離 L が短い場合 (D) には熱損失による温度低下が小さく、二段目燃焼の燃焼 温度が高くなるため NO 生成量が多くなる。

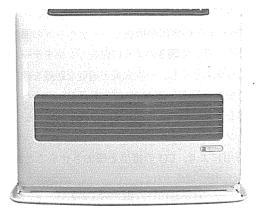


図 6. 平成 3 年度石油ファンヒーター(KD-336DS)の外観

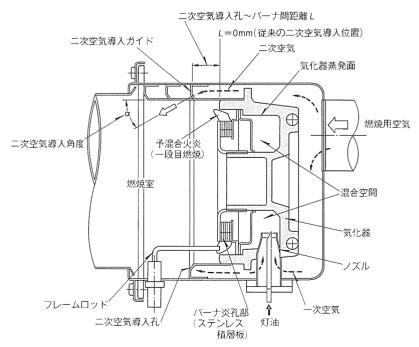


図7. 石油《クリーンヒーター》の二段燃焼器の構造

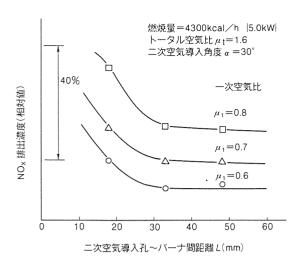


図8. NO_x 排出濃度に及ぼす二次空気導入孔~ バーナ間距離 L の影響

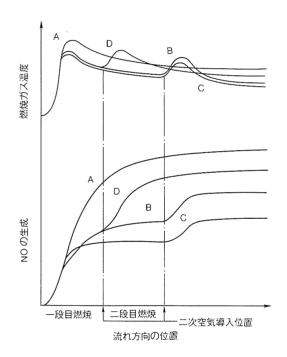


図9. 二段燃焼における NO 生成の模式

この二段燃焼方式による低 NO_X 化を製品に適用するに際しては、距離 L や二次空気導入角度 α や一次と二次の空気量配分などについて、 NO_X 排出濃度、CO やススなどの燃焼特性、及び燃焼器各部温度を考慮して最適化を図っている。また、不完全燃焼防止には従来と同様に炎電流検出方式を用いており、万が一燃焼状態が不良に陥ったとしても速やかに燃焼を停止させ、CO 排出を未然に防ぐことができる。このように、今回二段燃焼を採用しても安全性確保には十分な配慮を行っている。

平成3年度の新型石油《クリーンヒーター》にはこの二段燃焼方式の低NOx対策が搭載されており、従来に比べて約40%のNOx低減が実現されている。その新製品の外観を図10に示す。一層の薄型・コンパクトな設計になっている。そのほか、積層バーナの採用によって燃焼幅も100~44%と大幅に拡大されており、またファジー制御を搭載した室温調節に

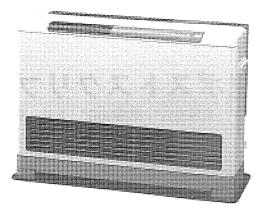


図10. 平成3年度新型石油《クリーンヒーター》の外観

よって快適性も一段と向上して、高品位な本格暖房を実現している。

なお,紙面の関係から説明は省くが,ガス《クリーンヒーター》についても石油同様二段燃焼を適用して低 NO_X 化が 実現できる。

5. む す び

当社家庭用燃焼機器の石油ファンヒーター,石油《クリーンヒーター》について,それぞれ大型保炎リングを用いたふく射体及び二段燃焼により,低 NO_X の燃焼器を開発した。そして,それらを平成3年度の製品に搭載することができた。今回は従来の燃焼器の構造を大きく変更することなく,比較的簡便な手段を採用することによって低 NO_X 化を実現したが,今後も一層の低 NO_X 化を推進することはもちろん,燃焼可変幅の更なる拡大,低騒音化,においの低減,など燃焼器の"基本性能の向上"を進め,安全で快適な暖房空間を提供する機器の開発を行っていく所存である。

参考文献

- (1) 総合研究プロジェクト別環境保全研究成果集,大気複合 汚染防止に関する総合研究 昭和63年度,環境庁企画調 整局
- (2) 吉野 昇:東京都における定置型内燃機関の窒素酸化物 対策,労働の科学,44巻8号 (1989)
- (3) 小宮山 宏(監修):地球温暖化問題ハンドブック, 125 ~129, アイピーシー, (1990)
- (4) 堀 守雄:第24回燃焼シンポジウム前刷集,343~345, 日本燃焼研究会 (1986)
- (5) 野間口 有,松井安次,根岸宣匡:新しい灯油気化式燃焼機—Air Jet Burner—三菱電機技報, **53**, No. 8,603~607 (1979)
- (6) 公開特許公報,平2-97808,液体燃料燃焼装置
- (7) 河上国彦,知久隆雄,小関秀規,菅原作雄,長谷川恵一 : 薄形高品位 FF 温風暖房機《クリーンヒーター》,三菱 電機技報,65, No. 8,740~747 (1991)

高速ポストスクリプト互換インタプリタ

田村正司* 斎藤雅行* 的場成浩* 大西 勝*

1. まえがき

近年、デスクトップ パブリッシングの普及に伴い、高品位なアウトラインフォントを印字可能なページプリンタの需要が拡大している。特に、ページ記述言語の一種であるポストスクリプト (注1) に対応したモノクロ又はカラープリンタが、欧米を中心に普及しつつある。ポストスクリプトは、多彩なグラフィック表現が可能な簡明なインタプリタ型のプログラミング言語である。また、アウトラインフォントの使用、デバイスの解像度に依存しないこと、言語仕様が公開されており、アプリケーションを容易に開発できることなど多くの利点を持つことから、ポストスクリプトはページ記述言語の業界標準となっている。

しかし、汎用のCPU上で動作するポストスクリプトは、 三次曲線演算等のグラフィック処理に時間がかかるため、処理の高速化が課題となっている。そこで、CPUに32ビット 高速 RISC プロセッサ XL 8200 を採用し、XL 8200 用に最適 化が図られているポストスクリプト互換の Imaging Systems Software (ISS)を採用した、高速なページプリンタ用コントローラを今回開発した。ここでは、開発したコントローラ の構成を述べ、その評価結果について考察した。

2. コントローラの構成

2.1 ハードウェアの構成

図1は開発したコントローラのハードウェアの概略構成を示したものである。XL 8200 は特にグラフィックス処理では非常に高速であるという特長を持つが、LSI の制御能力において汎用 CPU に劣るため、周辺 LSI の制御用に MC 68000を併用している。二つの CPU 間の通信には、相互間の CPU

割り込み及びコモンメモリを用いる。ホストインタフェースは、セントロニクス準拠パラレル インタフェース、SCSI、RS-232 Cを備えている。また、135 M バイトのハードディスクを備えており、日本語アウトラインフォント(細明朝体及び中ゴシック体)のデータが格納されている。このフォントデータはプリンタの初期化時に、MC 68000 によって XL 8200 のワークメモ

(注1) "ポストスクリプト" は米国 Adobe Systems 社の登録商標である。 リに転送され、XL 8200 が直接アクセスできるようにする。 また、XL 8200 のワークメモリには、フォントデータのほか、 Virtual Memory (VM)、ポストスクリプト固有の各種辞書、 ページバッファなどが含まれている。また、プリンタエンジ ンとのインタフェースについては、MC 68000 がコマンド通 信を行い XL 8200 がデータ転送を行う。

2.2 ファームウェアの構成

図2はコントローラのファームウェア構成を示したものである。このファームウェアは大別して、ポストスクリプトインタプリタ及びインタプリタのデータ入出力を行う I/O

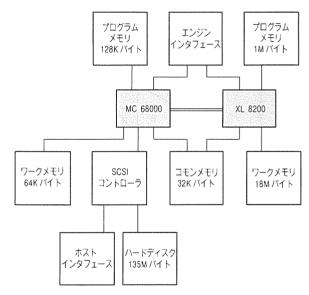


図1. コントローラのハードウェア概略構成

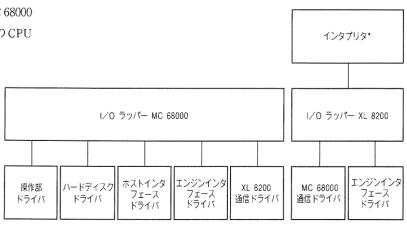


図2. コントローラのファームウェア概略構成

*:購入部分

ラッパー (wrapper) とに分かれる。また、I/O ラッパーは MC 68000 及び XL 8200 のファームウェアによって構成される。

図3に MC 68000 用のファームウェア構成を示し、以下に 動作の概略を説明する。

コントローラの電源が投入されると、MC 68000 によってハードウェア初期化 (LSI の初期設定等) 及びファームウェア初期化 (RAM チェック、フラグ設定等) が行われる。そして XL 8200 の起動を行い、アイドル (データ待ち) 状態になる。また、言語受信処理は、ホストから送られてくるポストスクリプト言語データをホスト インタフェースを介して受信し、ハードディスクに格納する。また、言語転送処理は、ハードディスク内の言語データを XL 8200 に転送する。印刷処理は、インタプリタからの印刷要求に従ってプリンタエンジンへ印刷コマンドを発行する。そのほか MC 68000 では、オペレーションパネルの制御、プリンタエンジンのステータス管理及び XL 8200 との通信などを行う。

表1にISSの概略仕様を示す。ISS はポストスクリプトの v. 47に対応したインタプリタであり、日本語オペレータ及 びカラーオペレータの一部をサポートしている。また、図4には ISS を含めた XL 8200 用のファームウェア構成を示す。 MC 68000 によって XL 8200 に起動がかかると、ファームウェア初期化 (RAM チェック、フラグ設定等) が行われ、インタプリタに制御を渡す。その後言語受信処理内でデータ待ち状態となる。ここでインタプリタは、最初に日本語アウトライン フォントデータを MC 68000 から受け取る。フォントデータの受信は、通常のインタプリト動作の一貫として行われ、ポストスクリプト言語仕様で定義される Type 3 フォ

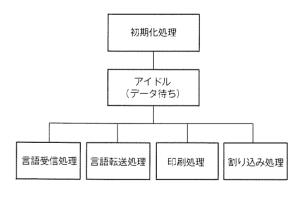


図3. MC68000用ファームウェア構成

表1. ISS の概略仕様

項目	内容
ISSのバージョン	リリース 2.12
対応する ポストスクリプト	バージョン 47 (日本語, カラー拡張の一部)
	英 語 35 書体
フォント	日本語 2 書体 (細明朝体,中ゴシック体)

ントとして辞書登録される。また、言語受信処理では、MC 68000から受け取ったポストスクリプト言語データを逐次インタプリタに引き渡す。インタプリタで1ページ分のインタプリトが終了すると、印刷処理を起動する。印刷処理ではプリンタエンジンからのライン同期信号に同期してビットマップデータをプリンタエンジンに転送する。そのほか XL 8200では、標準/エラー出力処理、MC 68000 との通信などを行う。

2.3 マンマシン インタフェース

(1) 標準/エラー出力

ポストスクリプト言語仕様では、通常のポストスクリプト言語データを入力する標準入力のほかに、インタプリタの実行状態をホストに告知する目的で、標準/エラー出力を備えている。この機能は ISS においても組み込まれており、インタプリタの実行状態が XL 8200 側の I/O ラッパーに知らされる。このコントローラでは、XL 8200 側の I/O ラッパーがインタプリタから標準/エラー出力としてアスキー文字列を受け取り、コモンメモリに書き込む。そしてMC 68000 側の I/O ラッパーのオペレーションパネル制御により、使用者がオペレーションパネルの操作で、液晶パネル上にこれを表示可能な構成にしている。

(2) 動作モードの切替え

このコントローラは、接続するプリンタエンジンに応じて、モノクロでの動作及びカラーでの動作が可能である。これは、コントローラの電源投入時に使用者が、オペレーションパネル上で選択することで実行できる。動作モードの選択により、XL8200のファームウェア及びMC68000の印刷処理部分のファームウェアが切り替わる。これにより、複数のプリンタエンジンに対応している。

(3) 自己印字

このコントローラでは、ハードディスク内に自己印字用の ポストスクリプト言語データが格納されている。オフライン アイドル時に自己印字が実行可能である。

また、このコントローラでは、ホストから受け取ったポストスクリプト言語データをいったんハードディスクに格納する構成をとっている。そのためオンラインアイドルの状態で、

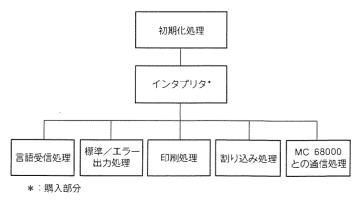


図4. XL8200用ファームウェア構成

最後に印字したデータを再印字することができる。これによ り、再印字のためにホストから再びデータを転送する必要が なく、使用者の作業の効率化を図ることができる。

3. 評 価

3.1 インタプリタの評価

ISS はポストスクリプト互換ソフトウェアであり、使用に 当たってはその互換性を評価する必要がある。この節では、 オペレータの互換性及びISS の中間調表現方法について評 価を行った。

3.1.1 互 換 性

この項では、ISS とポストスクリプトのオペレータの互換 性について確認した。ポストスクリプトでは、一般的なプロ グラミングタスクの実行など多岐にわたる実行ステータスが 存在する。そのため、オペレータの組合せは無限にあり、す べての組合せについて互換性を確認することは不可能である。 ここでは ISS をモノクロ動作させ、モノクロ ポストスクリ プトとの比較を行った。比較に用いたプリンタは、ポストス クリプト対応モノクロ レーザプリンタであり、評価に使用 したファイルは、グラフィック系オペレータごと及びこれら の組合せによる127ファイルである。

評価の結果、ISS はポストスクリプトに対し、おおむね互 換性を持っていることを確認した。

3.1.2 中間調表現

ポストスクリプトでは、使用者側で自由に中間調の表現方 法(疑似階調パターン及びスクリーン角)を設定可能なオペ レータが用意されている。しかし、ポストスクリプト搭載プ リンタが標準で持つ中間調表現方法は、アドビシステムズ社 のライセンスであり、ISS では異なった中間調表現方法を採 用せざるを得ない。そこでポストスクリプトで表現可能な 33 階調の出力結果を、ポストスクリプト搭載プリンタ及び このコントローラについて比較した。さらに、ISS の標準の 疑似階調パターン及びスクリーン角について解析を行った。

(1) 中間調濃度

図5は、ISS 及びポストスクリプト搭載プリンタの階調濃 度レベルを比較した結果である。ここでは Setgray オペレ ータのパラメータに対応する階調濃度値を正規化し、Setgray 値に対応するようにしている。図5から、計測された 濃度値は、全体としては ISS の方がポストスクリプトより も直線に近い特性を示しているといえる。また、これに対し グレイスケールの実際の記録例を図6に掲載する。同図を主 観評価するとポストスクリプトの方が濃度変化が緩やかで、 ISS はところどころ変化が急しゅんで不自然さを感じる。 ISS の急しゅんな濃度変化は、図5の濃度値にも表れている。 ここで、階調濃度値は、プリンタエンジン自体の特性にも影 響を受けるが、異なるプリンタエンジンを用いた同様の測定 においても図5と同様な結果が得られている。したがって、 図5に表れた濃度特性は、ISS の持つ中間調表現方法に起因 するといえる。

(2) 疑似階調パターン及びスクリーン角

ISS の持つ疑似階調パターン及びスクリーン角について解 析を行った。ここでは ISS をカラー動作させ、イエロー、 マゼンタ及びシアンの各色について顕微鏡写真を基に推定し た。図7は推定されるしきい値マトリクスであり、階調変化 に伴い矢印の方向へ順次ドットが塗りつぶされる。

解析の結果、単位セルは4×4(画素)、しきい値マトリク スは8×8 (画素), 塗りつぶし方法は Fattering Type 若し くはそれに近い方法、スクリーン角は45°、中心間距離は 0.75 mm であると推定される。これらについては各色とも 同様である。また単位セルのずれはイエロー及びマゼンタが (5, 5), シアンは(4, 4) であると推定される。

3.2 コントローラの速度評価

ISS をカラー動作させ、このコントローラの展開実行速度 をポストスクリプト搭載プリンタコントローラと比較した。 測定環境は図8のような構成をとり、両者の違いがコント ローラのみとなるようにした。また、図9は比較に用いたフ

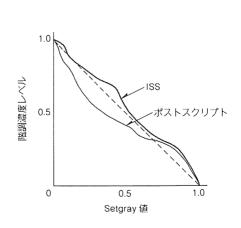
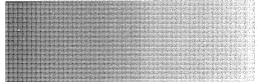
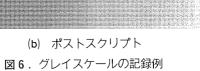


図5. 階調濃度の比較



(a) ISS





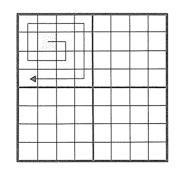


図7. しきい値マトリクス

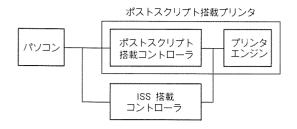


図8. 測定環境



図9. ファイルの記録例

ァイルの記録例であり、図10は実測した文書の展開時間である。図において展開時間とは、ホストインタフェースを介して文書データを受信し始めたときから、文書を展開し終えてプリンタエンジンに起動がかかるまでをいう。また、インタプリトのみの時間とは、XL8200がデータを受けてから展開し終えるまでの時間をいう。ポストスクリプト搭載プリンタではインタプリトのみの時間は実測していない。

図10から、開発したコントローラはポストスクリプト搭載プリンタコントローラの5倍程度高速であるという結果が得られた。しかし、ここで注意しなければならないのが、両者の日本語フォントデータの格納及び利用方法の相違である。ISSではフォントデータはすべてDRAM上に配置し、随時アクセスして使用する構成をとっている。これに対し、ポストスクリプト搭載コントローラではハードディスク上に日本語フォントデータを配置し、随時アクセスして使用する。また、ポストスクリプト搭載コントローラは、英語フォントデータをROM上に持っている。一般的に、DRAMにアクセスする速度に比べてハードディスクにアクセスする速度は1/100以下と遅い。そのため、日本語を含む文書を展開す

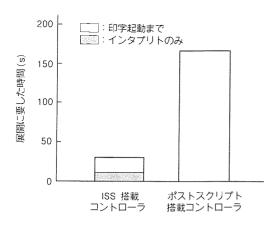


図10. 展開に要した時間の比較

る場合には、両者の構成の相違が展開速度に及ぼす影響を考慮すべきである。これに対し、同様のレイアウトの文書で英文のみで記述したファイルを展開させた。

その結果、日本語を含む文書を展開させた場合と同様に、このコントローラの方が5倍程度高速であるという結果が得られた。これはポストスクリプト搭載コントローラが、フォントデータに対するアクセス効率を向上する目的で使用しているフォントキャッシュが有効に機能しており、ハードディスクに対するアクセス回数を最小限にしているためと考えられる。

また、その他10種類のファイルを展開させたが、すべて ISS の展開速度の方が3~5倍高速であった。このコントローラの高速性の要因としては、XL8200及びISS の高速性を十分に生かすハードウェアを構成したことが挙げられる。また、ISSをサポートするファームウェア、特にMC68000と XL8200のデータ通信処理が高速に行えるように設計したことが、この結果に寄与していると考えられる。

4. む す び

日本語ポストスクリプト互換インタプリタを搭載した高速なプリンタコントローラを開発した。開発したコントローラは、CPUにMC 68000及び XL 8200を採用し、XL 8200上にISSを搭載している。また、このコントローラは、当社製カラープリンタ G 370に接続することができる。評価の結果、開発したコントローラは、従来のポストスクリプト搭載コントローラに比べて、3~5倍高速に処理を行えることを確認した。また、ISS はポストスクリプトに対して十分な互換性を持っていることも確認できた。

この開発によって、プリンタに高付加価値をもたらすインテリジェントなインタフェースを導入する基盤を築くことができた。また、開発したコントローラはハードウェアを自製化しており、ソフトウェアもソースコードで保有していることから、今後プリンタ組み込み用途以外の画像通信システムへの適用が可能である。

並列推論マシン(PIM/m)用 VLSI

古谷清広* 安田憲一* 町田浩久* 安藤秀樹* 武田保孝** 中島 浩**

1. まえがき

大規模並列推論マシン PIM/m (Parallel Inference Machine) (1) の要素プロセッサの VLSI 化にこのほど成功したので、その内容について報告する。PIM/m は、第五世代コンピュータ プロジェクトの一環として当社が開発している並列推論マシンであり、既に開発された中規模の並列推論マシン Multi-PSI/v2(2)の後継機として位置づけられる。PIM/m は要素プロセッサを二次元格子状に接続したマシンであるが、要素プロセッサを VLSI 化することによって実装密度が飛躍的に向上し、Multi-PSI/v2の4倍である256個の要素プロセッサをほぼ同一のきょう(筐)体に実装することが可能となった。

性能面では、要素プロセッサのアーキテクチャの改良が大きな効果を発揮している (3)(4)(5)。PIM/m では5ステージのパイプラインを導入した。論理型言語の実行に必す(須)であるデータの型判定もパイプライン化したため、実行ステージの負荷を大きく軽減することができた。また、メモリを命令用とデータ用に分離するハーバード アーキテクチャの採用によって、メモリアクセスに伴うオーバヘッドが著しく改善されている。これらアーキテクチャ改良と、VLSI 化による遅延時間短縮との相乗効果により、ベンチマークプログラムの性能は3から6倍に向上している。

以下、本稿ではPIM/mの要素プロセッサのアーキテクチャとそれを構成するキーデバイスのVLSI化について述べる。

2. PIM/mの概要

PIM/m は、図1に示すように最大16×16の二次元格子状に256個の要素プロセッサを結合した疎結合のマルチプロセッサである。ディスクなどの入出力装置やフロントエンドプロセッサ(FEP)も接続することができる。

PIM/mでは、データや制御情報の送受はネットワークを介したメッセージ通信によって行われる。このメッセージ通信を高速に行うために、各要素プロセッサはネットワークコントローラを持っている。ネットワーク コントローラは、送られてくるメッセージのあて先により、自動的にネットワークのスイッチングを行うため、単に通過するだけのメッセージについては CPU での処理は全く不要となる。また、隣接するプロセッサを結ぶネットワークチャネルは完全に双

方向であり、かつ行き先のチャネルが競合しない限り複数の メッセージを同時に処理することができる。

PIM/m の要素プロセッサで実行されるプログラムは、K L1 と呼ばれる並列論理型言語である。一方、FEP では逐次処理型の論理型言語であるKL0 やESP が実行される。

3. 要素プロセッサ

要素プロセッサは、図2に示すように三つの VLSI チップ PU (Processing Unit), CU (Cache Unit), NU (Network Control Unit) を中心に構成されている。PU チップは、5 ステージのパイプラインを持ったマイクロプロセッサであり、32 K ワードの WCS (Writable Control Storage) に格納されたマイクロプログラムによって論理型言語を実行する。CU チップは1 K ワードの命令キャッシュ、4 K ワードのデータキャッシュ(データメモリはチップ外)のほか、TLB (Translation Look aside Buffer) や主記憶の制御回路からなる。NU チップは、隣接する 4 プロセッサを結ぶネットワークチャネルのスイッチングを行うとともに、PU チップが行うメッセージの送受信を制御する。

これら三つの VLSI は、CMOS セルベース方式によって 設計した。チップ諸元を表1に示す。

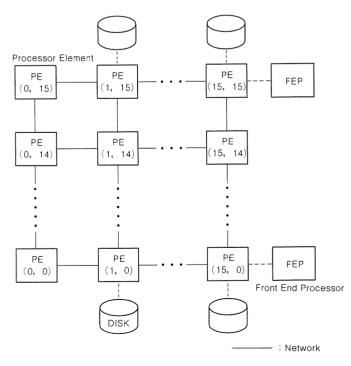


図1. PIM/mの構成

3.1 PUチップ

3.1.1 タ グ

論理型言語では変数に対する型宣言がないため、変数は任意の型のデータを保持することができ、かつ一般にはコンパイル時に変数の型を予測することができない。したがって、変数のデータの型を実行時に定め、かつ判定する処理が必要となるが、これを実現するものがタグである。論理型言語の処理では、このタグの操作が重要であり、PU チップの設計に際してもその高速化に重点をおいた。

PIM/mでは、図3に示すように1ワードの幅は40ビットであり、その内の8ビットがタグとして用いられている。すなわち、図3(a)は整数の1,990であり、(b)は1,990番地へのリストセルへのポインタである。(c)は参照ポインタと呼ばれる特殊なポインタであり、データの操作をポインタが指しているデータに対して行うことを示している。一般には、任意段数の参照ポインタの連鎖の末尾に操作すべきデータがある。したがって、データ操作を行う際には参照ポインタをたどり、その末尾を見つけるデレファレンスという処理が必要となる。

3.1.2 ハードウェア構成

PU チップは**図4**に示すように、D、A、R、S、E の五つのパイプラインステージで構成されている。

Dステージには命令デコードのためのRAMテーブルがあり、マイクロプログラムの実行開始アドレスや下流のステージを制御するためのナノコードが格納されている。デコーダをRAMで構成したことは、複数言語のサポートやマイクロプログラム開発に多大な効果をもたらしている。

Aステージではオペランドのアドレス計算を行い、 Rステージはその結果に基づき、主記憶からオペラ ンドを読み出す。

Sステージは、主記憶上のオペランド及びそのア

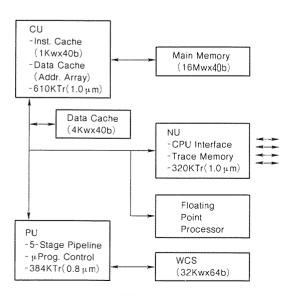


図2.要素プロセッサ

ドレス、命令フィールド、レジスタファイル(RF)、ワーキングレジスタ(WR)、及び幾つかの特殊、レジスタ(SR)の中から、三つのデータをオペランドとしてEステージに引き渡す。また、主記憶から読み出したオペランドのタグにより、Eステージで実行されるマイクロプログラムの開始番地を修

表1. PU/CU/NU チップの諸元

	PU	CU	NU
プロセス(μm)	0.8	1.0	1.0
トランジスタ数(千個)	384	610	329
RAM	270	542	261
PLA	4	3	
ロジック	110	65	68
チップサイズ(mm)	16.3×13.6	14.5×14.8	14.2×14.0
消費電力(W) (@ 5 V)	2.5	2.3	2.2
パッケージ		361PGA	
動作サイクル		65ns	

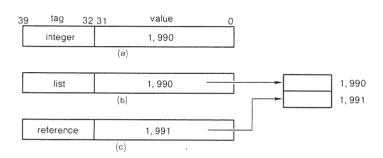


図3.データの内部表現

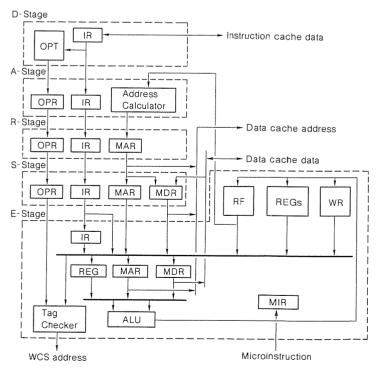


図4. PU チップの構成

飾する機能があり、頻繁に行われるデータタイプの判定がパイプライン化されている。

Sステージのもう一つの重要な機能として、デレファレンス機能がある。RFを元データとするデレファレンスの場合、元データのタグが参照ポインタであるときのみRステージで主記憶の読出しが行われる。さらに、その結果が参照ポインタであるときには、Sステージによって参照ポインタでないデータが見つかるまでデレファレンスが行われる。

Eステージは、フェーズ1とフェーズ2の並行に動作する 二つのブロックから構成され、マイクロプログラムによって 制御される。フェーズ1には命令レジスタ、RF、WR及び SRがあり、この中から二つのものが選択されてフェーズ2 に送られる。なお、マイクロプログラム ルーチンの最後の マイクロ命令では、フェーズ1はSステージによって制御され、オペランドのセットアップのために使用される。

フェーズ2には、メモリアドレスレジスタ、メモリデータレジスタ及び作業用レジスタがそれぞれ二つある。フェーズ2ではこの中から二つのレジスタを選択し、演算結果をフェーズ1及びフェーズ2のレジスタに書き込む。

3.1.3 レイアウト設計手法

図5にPUチップの写真を示す。設計期間短縮のため、セルベース方式によって自動でレイアウト生成を行った。12k個のポリセルと、モジュールジェネレータによって生成されたRAMやPLAからなる。

クロックスキューを最小にするため、図 6 に示すようにクロックバッファをチップの両サイドに配置した。バッファからフリップフロップまでのクロック線の抵抗を下げるため、垂直チャネルの線幅を広く($10~\mu m$,第 $2~\mu m$)し、水平チャネル内で両バッファの出力を結合した。

駆動するゲート数,及び配線経路から求められる抵抗値と容量値で簡単な SPICE シミュレーションを実行しただけで, 実際のチップを EB テスタで実測した結果,2 ns 以内のクロックディレイと1 ns 以内のクロックスキューを達成するこ

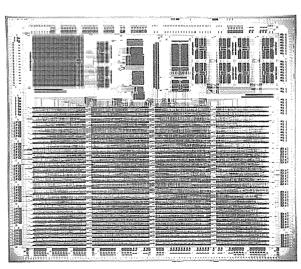


図 5. PU チップ写真

とができた(図7)。この簡単なクロック方法は、これからの大規模 ASIC に十分適用が可能と考えられる。

3.2 CU チップ

3.2.1 ハードウェア構成

CU チップは図8に示すように、命令キャッシュブロック、データキャッシュ ブロック及び主記憶インタフェース ブロックから構成されている。命令キャッシュブロックは、4ワード/blockのダイレクトマッピング方式の1Kワードのデータメモリと256ワードのタグメモリ及び2セット、64エントリのセットアソシアティブ方式のTLBとからなる。命令キャッシュのヒット率の予測値は94.4%であり、キャッシュ容量を2倍にしてもヒット率は全くといってよいほど向上しないため、妥当な容量であると考えられる。TLBのヒット率については、評価データの理想値である、99.83%が得られている(6)。

CU チップのピン数削減のため、PU チップと命令キャッシュブロックのインタフェースはアドレス/データ共用信号となっているので、命令キャッシュブロックにはPU チップ

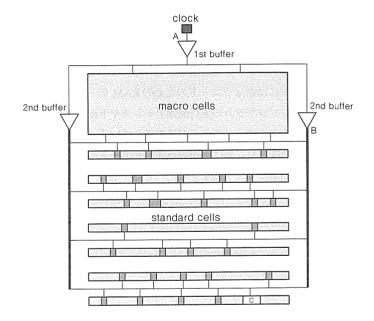


図 6. PU チップのクロック配線

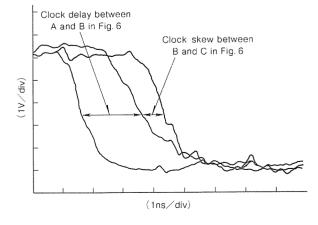


図7. PU チップのクロック波形

のプログラムカウンタのコピーがある。このプログラムカウンタの操作に関しては、命令フェッチの際には自動的にインクリメントされるのでオーバヘッドはないが、PUチップが分岐処理を行う際には正しいプログラムカウンタの値をセットする必要がある。

データキャッシュ ブロックは、4ワード/block のダイレクトマッピング方式の1Kワードのタグメモリと、2セット、64エントリのセットアソシアティブ方式のTLBとからなる。データメモリは、チップサイズの関係からチップ外部に置かれている。データキャッシュとTLBのヒット率はそれぞれほとんと理想値に近い99.2%と99.88%と予測されている。

このほか、データキャッシュ ブ

ロックには論理型言語に特有のバックトラック処理をサポートするための、Trail Buffer という32エントリのスタックがある。論理型言語ではバックトラックが発生すると、それまでに行った変数への代入をリセットしなければならない。このため、変数への代入の際にはそのアドレスをTrail Stack というスタックに記憶しておく必要がある。Trail Buffer は、Trail Stack の最上部のキャッシュであり、変数の代入のための書込み操作の際に、そのアドレスが自動的にプッシュされる。また、バックトラックの際にはアドレスのポップアップとアドレスのリセットのための書込みがCUチップ内部で行われる。

主記憶 (物理記憶) の各ワードには、1ビット誤り訂正/2ビット誤り検出可能な ECC 符号の検査ビットが付加されている。主記憶インタフェースでは、ECC による誤り訂正、検出、検査ビットの付加のほか、主記憶の動作タイミング生成も行われる。

3.2.2 レイアウト設計手法

図9にCUチップの写真を示す。PUチップと同様のクロック配線手法を用いて、セルベース方式によって、60Kトランジスタの標準セルと、モジュールジェネレータで自動発生した80KビットのRAMを自動配置配線した。レイアウトは、配線長を短く抑えるために、命令キャッシュブロック、データキャッシュブロック、主記憶インタフェースブロックをサブブロックとして階層的に自動配置配線を実行した。

図10に各ブロック内の配線長を示す。配線長はブロックのサイズが大きくなると増加するが、ブロック分割によって

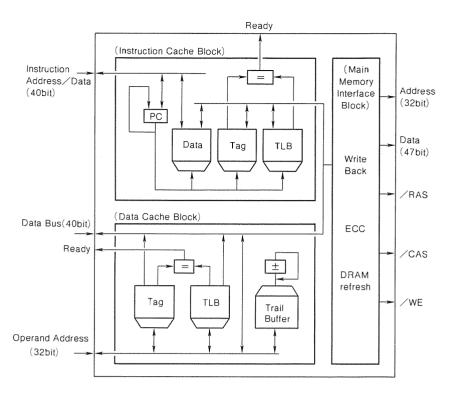


図 8. CU チップの構成

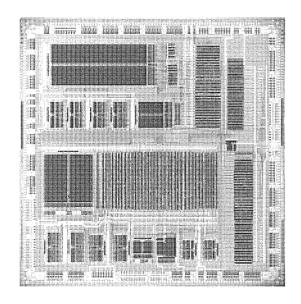


図 9. CU チップ写真

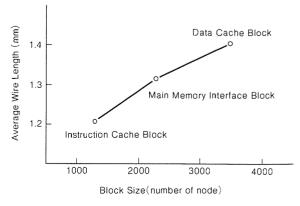


図10. 自動配置配線による平均配線長

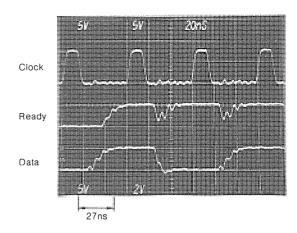


図11. 命令キャッシュ読出し波形

各ブロックサイズが小さくなっているので配線長は短く抑えられている。さらに、クリチカルパスを構成するヒットチェッカやプログラムカウンタを標準セルでモジュール化してサブブロック内に配置した。図11に命令キャッシュの読出し波形を示す。命令キャッシュの READY 信号の遅延時間は27 ns である。自動配置配線ではブロックサイズが大きくなると急激に処理時間が増加するが、階層レイアウトを行うことによってレイアウトの生成、検証に要する時間が大幅に短縮し、1週間で処理することができた。

3.2.3 テスト容易化設計

CU チップのテストパターンは、410段のスキャンパスを利用してテストパターン自動発生プログラム (MULTES) によって発生した。スキャンパスの占める面積は2%である。スキャンテストによって内蔵 RAM を試験するとテスト時間が長くなるため、CU チップは40 ビットのデータバスを介して内蔵 RAM を読み書きする命令をそなえている。この命令を利用することによってスキャンテストの場合の4%のテスト時間で内蔵 RAM がテストできた。また、この命令を利用して内蔵 RAM のポーズテスト、電源電圧バンプテストを実行して内蔵 RAM の不良検出率を向上させている。

4. システム性能評価

表 2 は PIM/m 要素プロセッサにおける並列処理言語と,逐次処理言語の append 処理における性能を示したものである。また,比較のために Multi-PSI/v2, PSI-11 の性能も示している。

5. む す び

高集積のVLSIチップを用いることにより、従来の4倍の

表 2. 性能比較

	MI	LIPS
	KL1	/ KL0
PIM/m	0.60	1.40
Multi-PSI/v2	0.14	
PSI- [[0.43

注 MLIPS: Mega Logical Inference Per

Second

1 秒間の推論数

KL1 :並列処理型論理型言語 KL0 :逐次処理型論理型言語

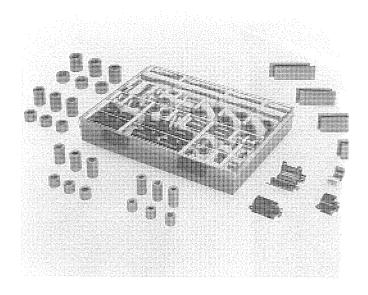
実装密度を達成することができ、大規模な並列処理が可能となった。また、論理型言語の特徴を考慮したパイプラインの導入やキャッシュメモリの構成等により、従来に比べて3から6倍に性能が向上し、要素プロセッサ単体で1.4 MLIPS (Mega Logical Inference Per Second)という世界的にトップクラスの推論速度を達成することができた。

参考文献

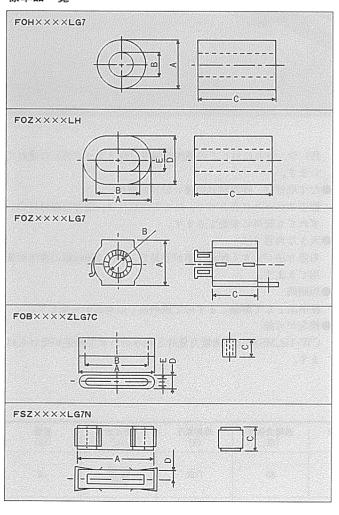
- (1) Uchida, S., Taki, K., Nakajima, K., Goto, A., Chikayama, T.: Research and Development of the Parallel Inference System in the Intermediate Stage of the FGCS Project, Proc. of the Intl. Conf. on Fifth Generation Computer Systems 1988, 16~36 (1988)
- (2) 益田嘉直,中川智明,岩山洋明,武田保孝,中島 浩,瀧 和男:) 制新世代コンピュータ技術開発機構向けマルチ PSI システム,三菱電機技報,62, No. 12, 1100~1105 (1988)
- (3) Nakashima, H., Nakajima, K.: Hardware Architecture of the Sequential Inference Machine: PSI-II, Proc. of 4 th IEEE Symp. on Logic Programming, 104~113 (1987)
- (4) 京 敬人・田辺隆司・立野裕和・中島 浩・近藤誠一: LSI 化高性能 AI ワークステーション MELCOM PSI II, 三菱電機技報, **62**, No. 2, 61~66 (1988)
- (5) Nakashima, H., Takeda, Y., Nakajima, K., Ando, H., Furutani, K.: A Pipelined Microprocessor for Logic Programming Languages, Proc. of Intl. Conf. on Computer Design, 355~359 (1990)
- (6) 中島 浩, 武田保孝: PSI-Ⅱのメモリ・アーキテクチャ 評価, 情報処理学会計算機アーキテクチャ研究会 90-A RC-80-8, 57~64 (1990)

EMC(輻射ノイズ)対策用フェライトコア

スポットライト"1ターンデバイス"



標準品一覧



電子機器の発達、普及に伴い、通信妨害や、機器の誤動作を 引き起こすノイズが問題となっています。世界的にもさまざ まな法規制が適用され、今日ノイズ対策は、重要な課題とな っています。EMC (不要輻射ノイズ対策) 用フェライトコア は、三菱の長年にわたる研究成果を基にこの障害波の発生を 抑えるために開発されたものです。広い周波数帯域で、抜群 のノイズ減衰効果が得られます。

特長

- ●高周波不要輻射ノイズ対策(100~300MHz)に対応した豊富な 品揃え (27品種)。
- ●各種規格を考えたフェライトコア材質の選択。透碰率Mioc:
- ●三菱独自の楕円形フェライトコアにより数ターンデバイスと しての使用も可能。
- ●丸ケーブル用フェライトコアにおいて、内8種類は分割、非分割 (ケース付) 形が選択可能。

標準寸法

_		TV. A	Т	寸		法		インリ	ピーダン:	ス(Ω)
Æ)	途	形 名	Α	В	С	D	Ε	30MHz	50MHz	I 00MHz
		FOH0910LG7	9.1	4.6	10.0			59	71	91
		FOH1615LG7	16.0	8.0	15.0			88	105	128
	非	FOH1630LG7	16.0	8.0	30.0			165	195	228
	7 F	FOH1815LG7	18.0	10.0	15.0			76	91	114
丸		F0H1830LG7	18.0	10.0	30.0			146	173	205
	分	FOH2115LG7	21.0	12.0	15.0			72	86	109
ケ		F0H2130LG7	21.0	12.0	30.0			146	173	205
ĺ ′	客	FOH2515LG7	25.0	15,0	15.0			71	86	109
	剖	FOH2530LG7	25.0	15.0	30.0			139	264	197
1		FOH2615LG7	25, 5	17.5	15.0	18,0	10.0	57	70	91
		F0H2630LG7	25, 5	17,5	30.0	18.0	10.0	109	130	159
ブ		FOB1615ZLG7C	20.0	8,5	18.5			73	88	112
	分	FOB1630ZLG7C	20.0	8.5	33, 5			139	169	207
		FOB1815ZLG7C	21.5	10.5	18.5			64	79	101
ル		FOB1830ZLG7C	21.5	10.5	33,5			124	152	106
		FOB2115ZLG7C	25, 0	12.5	18.5			61	75	- 99
		FOB2130ZLG7C	25.0	12.5	33.5			115	141	178
	割	FOB2515ZLG7C	29.0	15.5	18,5			59	73	97
		FOB2530ZLG7C	29.0	15.5	33,5			114	138	176
フ	非	FSZ3407 LG7	33.5	28.4	8.0	6,5	1.4	25	35	59
ラ	分	FSZ3407BLG7	33, 5	28.4	12.0	6.5	1.4	31	45	79
ッ	割	FSZ4007 LG7	40.0	34.8	12.0	6.5	1.4	30	42	69
٢		FSZ3413LG7N	33, 8	6.5	28,5			129	157	195
ケ	分	FSZ4713LG7N	46, 5	6,5	28.5			97	120	160
1		FSZ5713LG7N	56.7	6.5	28.5			83	105	150
ブ	割	FSZ6413LG7N	64.3	6.5	28,5			76	99	148
ル		FSZ7713LG7N	77.0	6.5	28.5			70	94	151

条件)測定機器:YHP4191A

周囲温度:25℃±5℃

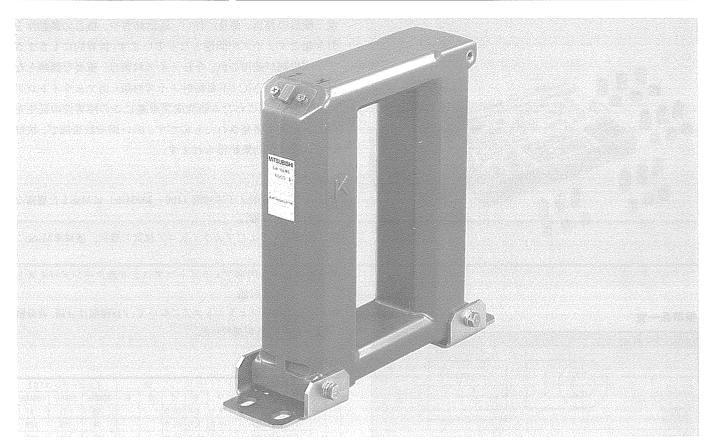
線:AWG18 100mm (丸ケーブルコア測定用)

フラットケーブル(16、18、26、34、40、50芯)

70mm (フラットケーブルコア測定用)

- 注記) インピーダンス値は、線を含む値(当社測定参考値)であり保証値では ありません。
- 1.上記標準品につきましては、サンプルキット (携帯用)を用意しております。 ご希望の際には、お申し付けください。
- 2.上記標準品以外にも、寸法変更 (深さ方向)、コーティングについては、別 途ご要望賜わります。

低圧変流器5000/6000A スポップィ CW-40LM,15LMS



従来、低圧変流器CWシリーズは一次定格電流として4000A まで製品を品揃えし好評を得ています。三菱電機では、最近 の設備の大容量化に対応するため、一次定格電流として 5000/6000Aの変流器 (CW-40LM/CW-15LMS) を開発しま した。

特長

●優れた耐環境特性

当社の長年の経験に裏打されたエポキシレジンを採用してお り、温度・湿度・有害ガス等耐環境特性に優れています。

●優れた耐ヒートサイクル・耐クラック性

巻線、鉄心、二次端子とエポキシレジンは、合理的な均衡をも った構造により、温度変化による内部応力(耐ヒートサイクル 性)や、外力に対しての機械的強度(耐クラック性)に優れて います。

- ●たて取付け、横取付けの使い分けが簡単 盤のスペースに合わせて、たて方向取付け、横方向取付けのい ずれでも簡単に変更できます。
- ●大きな角窓寸法 角窓寸法が大きく配線工事が容易で、150、200mm幅の導体が使 用できます。

●短納期

標準品として準備しますので短納期での対応が可能です。

●検定が可能

CW-15LMS形は普通電力量計と組み合わせて検定が受けられ ます。

仕様

形 名	定格一次電流 (A)	二次電流 (A)	定格負担 (VA)	確度階級 (級)	過電流強度 (倍)	最高電圧 (V)	周波数 (Hz)	重量 (kg)
CW-40LM	5000	E	40	1.0	40	1150	50-60	14
CVV-4ULIVI	6000	5	40	1.0	40	1150	両用	14
CW JELIAC	5000	r	15		40	1150	50 または	14
CW-15LMS	6000	5	15	1.0	40	1150	# /5/J 60	14



特許と新案***

三菱電機は全ての特許及び新案を有償開放しております

有 償 開 放 に つ い て の お 問 合 せ は 三菱電機株式会社 知的財産渉外部 特許営業グループ Tel(03)3218-2137

冷凍サイクル装置 (特許 第1504144号)

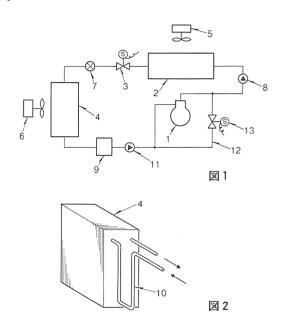
この発明は、毛細管や膨脹弁などの減圧器を用いた冷凍サイクルに関するものである。

従来,毛細管や膨脹弁などの減圧器を用いた空気調和装置は,圧縮機停止時,凝縮器より凝縮した高温高圧の冷媒液が毛細管または膨脹弁のブリードボードを通り低圧となっている蒸発器中にたまり、蒸発器中の低温冷媒と混合し熱ロスを発生する。また,この蒸発器中にたまり込んだ液が圧縮機起動と同時に圧縮機に戻る液バックを生じ,圧縮機故障やアキュムレータの大容量化,液圧縮による入力アップ,凝縮した液が冷却に利用されないため立上り時間がかかるなどの欠点を有していた。

この発明は、このような点を解決するためになされたもので、図1の実施例に示すように、凝縮器(2)の出口側から蒸発器(4)の入口側に至る管路に圧縮機(1)の起動時に開き、停止時に閉じる電磁弁(3)を設け、かつ圧縮機(1)の吐出側と吸込側とをバイパスするバイパス路(12)の中途に圧縮機の停止時に開き、起動時に閉じる電磁弁(13)を設け、さらに蒸発器入口側管路に図2に示すトラップ(10)を形成させて、凝縮した冷媒の冷却作用への有効利用ができるようにするとともに、圧縮機の起動がスムースに行え、また、液バックの防止、ア

発明者 飯島 等,松岡文雄,笠置 紘,山崎起助,村井直道 キュムレータの小形化,液圧縮による入力アップの防止を図 れるようにした。

以上のようにこの発明によれば省エネ,信頼性向上,コスト低減が達成できる冷凍サイクル装置を提供することができる。



軸流ファン (特許 第1600942号)

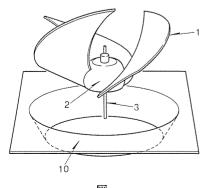
この発明は、換気扇やエアコンに用いられる軸流ファンの 空力騒音を低減することを可能にした軸流ファンに関するも のである。

軸流ファンの空力性能を落とさないで騒音を低減する手法 は確立しておらず、個々の製品に対応したその場限りの低騒 音化手法がとられており、軸流ファンの低騒音化手法の一つ として、羽根車を吸込み側に移動する方式のものがあるが、 これも開放動作点における騒音レベルを低下させることはで きなかった。

この発明は、上記のような問題点を解消するためになされたもので、開放動作点において騒音レベルを大幅に低下できる軸流ファンを得ることを目的としている。実施例を図の分解斜視図に示すように、羽根車(1)は翼弦線中心点が気体の吸込み側に前傾していると同時に、回転方向に前進させた形状であり、更に羽根車(1)に対して吸込みベルマウス(10)の入口曲率半径、内径、羽根車の翼端部を覆うベルマウスの長さ

発明者 大蔦勝久,中島倉男,岩村義巳 を最適化しており、開放動作点における騒音レベルを大幅に 低減できる。また、軸流羽根車の基本形状を5つのパラメー タで規定するとともに、ベルマウスを3つのパラメータで設 定することにより低騒音化手法が確立される。

以上のようにこの発明によれば低騒音化が達成された軸流 ファンを提供することができる。



図



特許と新案* * *

三菱電機は全ての特許及び新案を有償開放しております

有 償 開 放 に つ い て の お 問 合 せ は 三菱電機株式会社 知的財産渉外部 特許営業グループ Tel(O3)3218-2137

荷電粒子装置

(特開昭62-26797)

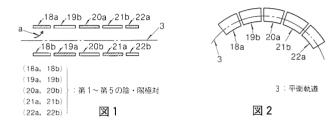
この発明は、電子ビームのような荷電粒子ビームを加速するための円形状の平衡軌道を有する荷電粒子装置に関するものである。

従来, 軌道上の電子ビームを失わせる原因として, 真空中の残留ガス濃度にのみ着目し, 真空度を高めるチタンゲッタポンプ, スパッタイオンポンプを用いているが, この方法では真空中の残留ガスと電子ビームとの衝突によって生じた正イオンを除去することができず, このため電子ビーム中に蓄積される正イオンが増大し, 電子ビームの電流量に限界が生じ高強度化への障害となっていた。

この発明は、上記のような問題点を解消するためになされたもので、正イオンと電子ビームとのエネルギー差、及び電気的性質を利用して、電子ビームの安定した運動に対して与える影響を極力少なくし、正イオンだけを除去することで電子ビームの存在の長期化を図ることを目的としている。実施

発明者 上田孝寿, 溝田 学, 福本信太郎, 中村史朗 例 図 1, 図 2 に示すように, 周回平衡軌道(3)を挟んで陰電 極 (18 a ~22 a), 陽電極 (18 b~22 b)を対向配置し, 電極間に数 kV の電圧を正負交互に印加することにより, 電子ビームが電極によって形成される電界の影響を無視でき,正イオンのみを除去できる。

以上のようにこの発明によれば、平衡軌道を挟んで陰・陽 電極を設けたことにより、障害となっていた正イオンを除去 することができ、高性能の荷電粒子装置を提供することがで きる。



〈次号予定〉三菱電機技報 Vol. 65 No. 12 三菱クライアントサーバコンピュータ apricot シリーズ特集

特集論文

- ●apricot シリーズ特集に寄せて
- ●日本におけるパーソナル コンピュータの今後
- ●90年代のソリューション型 LAN
- ●パソコン(PC)を中心とした クライアント サーバ コンピューティングの今後
- ●apricot シリーズの概要
- ●apricot シリーズのハードウェア
- ●apricot シリーズのソフトウェア
- ●apricot シリーズの通信ソフトウェア
- ●apricot シリーズのホスト接続
- ●クライアント サーバデータベースによる特許情報管理システム
- ●㈱神戸屋に見るマルチベンダシステム事例

●大規模情報システム

普通論文

- ●火力発電プラント向け第二世代ディジタルコントローラ "MELSEP 500 PLUS シリーズ"
- ●フライホイール式無停電電源装置
- ●機械加工用ワークローディング ロボット RV-K 10 形
- ●EPROM 内蔵超高速16ビットワンチップ マイクロコンピュータ
- ●パソコン用表示コントローラ M 64500 FP/AFP
- ●コードレス電話機用半導体
- ●スピーカー用音場再生技術 "ディジタル同相リニア" 方式スピーカーシステム

三菱電機技報編集委員

委員長 山田 郁 夫 委 名畑健之助 福岡正安 宇佐美照夫 風呂 功 大原啓治 松村恒男 名取直幸 吉岡 猛 鳥取 浩 岡田久雄 # 長崎忠一 11月号特集担当 中村史朗

三菱電機技報 65 巻11号

(無断転載を禁ず)

1991年11月22日 印刷 1991年11月25日 発行

編集兼発行人 長 崎 忠 一

印 刷 所 千葉県市川市塩浜三丁目12番地(〒272-01)

菱電印刷株式会社

発 行 所 東京都千代田区大手町二丁目6番地2号

日本ビル 6階 (〒100)

三菱電機エンジニアリング株式会社内

「三菱電機技報社」Tel.(03) 3218局2806

· 売 元 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地(〒101)

株式会社 オーム社

Tel. (03) 3233局0641代),振替口座東京6-20018

定 価 1部721円(本体700円)送料別

年間予約は送料共9,373円(本体9,100円)

山陽電気鉄道㈱納め スポットライト列車運行管理システム



三菱電機では、列車の運行業務の効率化と旅客サービスの向上を目的として、 山陽電気鉄道㈱向けに列車運行管理システムを納入しました。このシステムは、本線及び網干線の全線を対象とし、中央で全線を一括して集中管理、制御する中央集中方式を採用しており、構成は、①ダイヤ管理、運行監視、運行制御、等の運行制御系の処理を行う中央計算機《MELCOM350-60/600》、②全線の列車在線状況、列車遅延状況の運転情報端末装置《MULTI-16IV》送信、等の運行情報系の処理を行う運転情報伝送装置《MELCOM350-60/300》から成っています。このシステムの主な特長は、次の通りです。

システム構成上の特長

- ●主要駅及び関係部所でも列車在線状況、列車遅延状況並びに運転整理内容がリアルタイムに確認できます。
- ●運行制御系と運行情報系とは別系統とし機能の分散化を図っています。
- ●伝送システムは、高効率、高信頼度な光LAN総合伝送路 《MELNET R32-F》を採用しています。また、既設のディジタ ル回線をバックアップ系とし伝送路の多重化を図っています。
- ●制御には、自動モード、CTCモード、現場モードの3つのモードを設け、制御モードの冗長化を図っています。

マンマシンインタフェースの特長

- ●指令室の指令操作卓を3卓設け、3卓同時に並列オペレーション が行えます。
- ●各操作卓は、高速高解像度のグラフィックディスプレイ装置、 操作入力用としてキャラクタディスプレイ装置及びライトペンで構成し、視認性と操作性に優れています。
- ●指令室の全体レイアウト、色彩、間接照明等、人間工学に基づくヒューマンデザインにより静かで快適な作業環境を形成しています。



システム機能上の特長

- ●ダイヤの種別を基に、踏切制御のための列車種別選別制御を行います。また、踏切保安を向上するため、接近列車の種別照合を行います。
- ●行先案内表示、ホーム案内放送及び出発合図器制御を行います。
- ●列車運行状況監視による提案型の運転整理を行います。
- ●指令員の操作訓練のための列車運行シミュレーションが行えます。

対象路線の概要

	Į	頁	- 1	1		内 容
制	御	対	象	路	線	○本線 54.7km ○網干線 8.5km ○網干線 8.5km
駅					数	48駅(42駅+6駅)
最	大	列	車	本	数	800本
列		車	租	Ē	別	10種類
ダ	1	+	7	種	別	4種
最大同時在線列車本数				車名	交	50本
連重	力駅間	月の量	是大き	川車2	大数	7列車