

## 特集論文

## 小型モジュール炉“SMR-160”向け計装制御システム

濱谷陽一郎\*  
Yoichiro Hamaya  
奥田 奨\*  
Susumu Okuda  
深見健太\*  
Kenta Fukami

東 哲史\*  
Tetsushi Azuma  
小西 遼\*  
Ryo Konishi

Instrumentation and Control System for Small Modular Reactor  
"SMR-160"

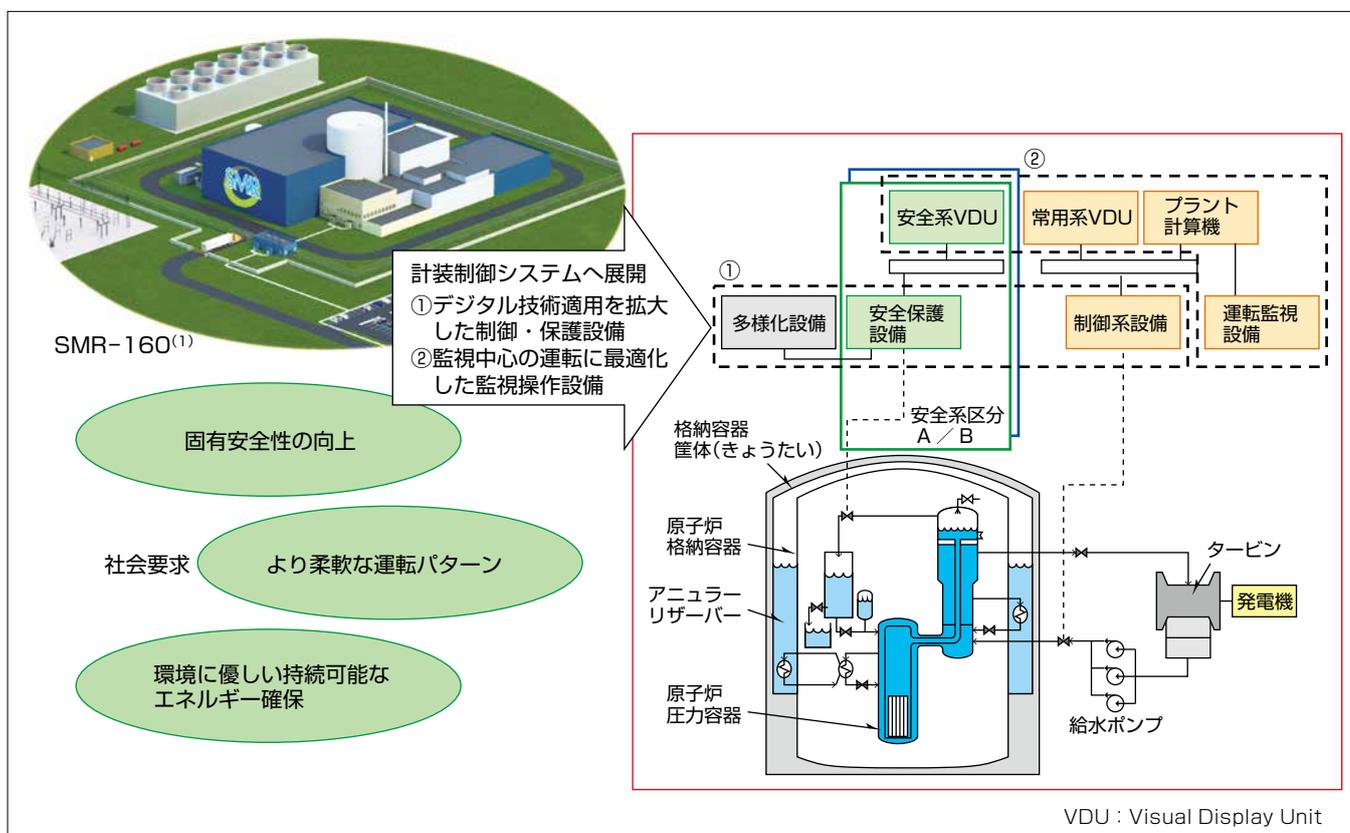
## 要 旨

脱炭素社会の実現に向けて、原子力発電プラントは理想的な選択肢として各国で技術開発が行われ、特に小型モジュール炉と呼ばれる原子炉は2020~2030年代での商業化を目指して米国ほか多数の企業・機関で開発が進められている。一般的に小型モジュール炉は、300MWe以下の出力の核分裂炉で、その特長として①小型(低出力)化による簡素な構造の受動的安全システムの適用、②柔軟な負荷追従運転による太陽光等の再生可能エネルギーとの共存、③分散電源と水素製造のための熱源利用等の応用性、④モジュール工法による工期短縮とコスト低減等がある。

三菱電機は、米国Holtec International社が進める小型

モジュール炉“SMR(Small Modular Reactor)-160”の開発に参画し<sup>(1)</sup>、計装制御システムの設備設計を担当している。SMR-160は米国エネルギー省の開発支援プログラムに選定されるなど、2029年ごろの実証炉運転開始を目標に開発を進めている。

SMR-160は、加圧水型軽水炉(PWR: Pressurized Water Reactor)の小型モジュール炉で、受動的安全システムと自動化によって高い安全性を持つ設計にしている。当社は自動化を担う計装制御システム(制御・保護設備、監視操作設備等)の開発に取り組んでいる。



## “SMR-160”向け計装制御システム開発のコンセプトと取組み

小型モジュール炉SMR-160向け計装制御システムは、制御・保護設備、監視操作設備等で構成される。SMR-160固有の安全性を考慮した設備、運転体制の合理化のため、制御・保護設備でのデジタル技術の適用範囲拡大や監視操作設備の開発を行っている。

## 1. ま え が き

小型モジュール炉は、一般的に①炉心の冷却に重力、浮力等の物理現象を利用する受動的な安全システムの適用とそれに伴う設備簡素化、②負荷追従運転による再生可能エネルギーとの共存、③熱源利用等の多目的利用、④モジュール工法に短工期といった特長を持つとされており、次世代の原子力発電の理想的な選択肢として期待されている。

原子炉は、事故時には停止後も崩壊熱を発生させ続けるため、一定期間崩壊熱を除去する必要があるが、小型モジュール炉は、従来の中・大型の原子炉と比較して、原子炉出力が小さいことから、外部からの冷却水や電源の供給なしに冷却を継続できる受動的な安全システムに適している。

当社は、米国Holtec International社が進める小型モジュール炉“SMR-160”の開発に参画しており、計装制御システムを担当している。

本稿では、SMR-160の特長とその特長を踏まえた当社担当の計装制御システムの開発について述べる。

## 2. 小型モジュール炉SMR-160

### 2.1 SMR-160の特長

Holtec International社が開発を主導しているSMR-160は、加圧水型軽水炉の小型モジュール炉で、その出力は熱出力525MWt、電気出力160MWeである。この出力サイズは分散電源としての需要、老朽火力発電所の更新、プラントの経済性等の観点で設定されている。

SMR-160の設計コンセプトは“walk-away safe”であり、設計基準事故に対してプラントを安全な状態に導くこと、また崩壊熱を安全に除去するための機能は、自動化されており、運転員の操作を必要としていない。

SMR-160は、受動的な安全システムの採用や1次系冷却材の自然循環によって、設備構成を簡素化することで、バルブ、ポンプ、熱交換器、計器及び制御ループといったコンポーネントが削減され、プラントの初期コスト低減を図っている。また、コンポーネントの削減は、関連する検査、試験、及びメンテナンスも削減できるため、運用コスト低減にも寄与する。

SMR-160の建設には、モジュール工法の考え方が取り入れられ、輸送可能な最大のコンポーネントまで工場で作造する。量産段階の建設ユニットでは、24か月の建設期間が想定されている。

SMR-160の主な用途は発電であるが、オプションとしてコジェネレーション(水素生成、地域暖房、海水淡水化

等)も想定している。SMR-160は、Holtec International社の空冷復水器を適用することで、冷却水がない地域に設置することが可能である。さらに、SMR-160は、“Black Start”(外部電源なしにプラントを起動)及び所内単独運転が可能であり、不安定な電力グリッドの地域や遠隔地等の分散電源としての利用に適したプラントである。

### 2.2 SMR-160の主要諸元と主要機器

SMR-160の主要諸元を表1に示す。SMR-160の1次冷却系統は、原子炉圧力容器とオフセット配置の蒸気発生器で構成され、加圧器は蒸気発生器と一体化されている(図1)。原子炉圧力容器と蒸気発生器は、ホットレグとコールドレグを含む短い2重管によって接続されている(図2)。これによって、接続部は大型配管の破断脆弱(ぜいじゃく)性が排除されている。オフセット構成を採用することによって、燃料交換時に原子炉圧力容器又は蒸気発生器を移動することなく原子炉燃料に簡単にアクセスが可能になっており、運用性が優れている。

1次冷却系統は1次冷却材の密度差及び原子炉圧力容器と蒸気発生器の高低差によって、自然循環するように設計

表1. SMR-160の主要諸元<sup>(2)</sup>

パラメータ	値
炉型	PWR
冷却材/減速材	軽水/軽水
熱出力(MWt)/電気出力(MWe)	525/160
1次冷却材循環	自然循環
1次冷却材圧力(MPa)	15.5
炉心入口/出口温度(℃)	241/321
燃料タイプ/アセンブル配列	UO <sub>2</sub> (二酸化ウラン)ペレット/正方形
燃料アセンブリ数	57
燃料サイクル(月)	24(通常)
反応度制御	制御棒操作 ケミカルシム
工学的安全施設	受動的な安全システム
設計寿命(年)	80
プラント面積(m <sup>2</sup> )	20,500
原子炉圧力容器の高さ/直径(m)	15/3

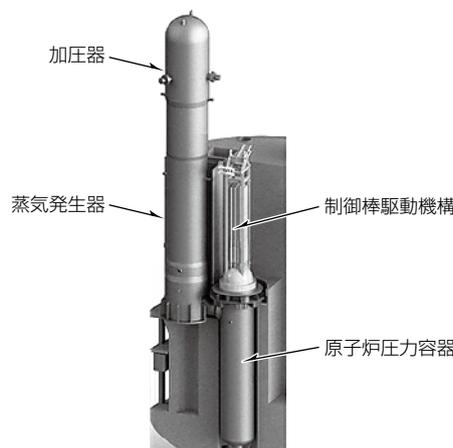


図1. SMR-160 1次冷却系統

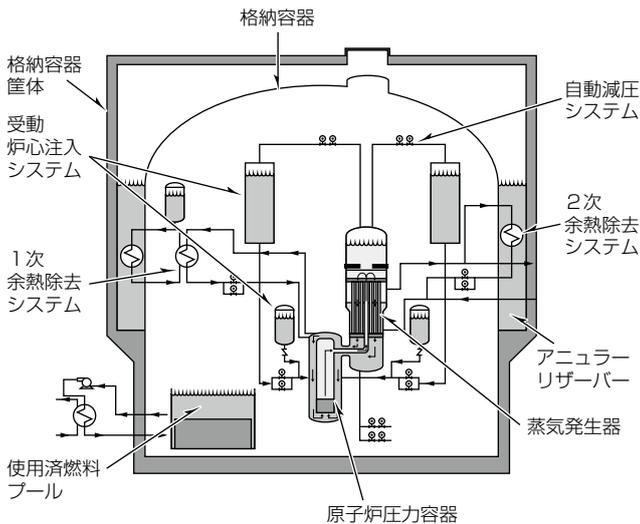


図2. SMR-160受動的な安全システムの構成

されている。この自然循環は、炉心内の燃料集合体が熱を発生する限り行われる。そのため、SMR-160の1次冷却系統にポンプなど強制循環させるための機器は不要になっている。

## 2.3 SMR-160の受動的な安全システム

### 2.3.1 受動的な安全システムのコンセプト

深層防護の観点から、SMR-160には崩壊熱を除去するため、多種多様な方法を用いたシステムが組み込まれている。炉心冷却に必要な全ての受動的な安全システムは堅牢(けんろう)な格納容器筐体(CES: Containment Enclosure Structure)内に配置されており、外部脅威から保護されている。冷却材喪失事故(LOCA: Loss of Coolant Accident)への対応に必要な全ての原子炉補給水は格納容器(CS: Containment Structure)内にあり、LOCA中にCSを隔離することで、公衆への線量や環境への影響を低減可能である。CESとCSの間(アンヌラーリザーバー)に蓄えられた大量の保有水が最終ヒートシンクになり、事故後の長期的な対処が可能である。これらの安全システムは、電源、補給水、運転員の操作を必要とせず、自動的に作動するように設計されている。

### 2.3.2 受動的な安全システムの構成

#### (1) 受動炉心冷却システム(PCCS)

PCCS(Passive Core Cooling System)は、想定事故の際に1次冷却系統に対して、非常用炉心冷却と安全注入を実施するシステムである。このシステムは、ポンプ等の設備を使用せず、炉心の冷却には自然循環、炉心への注水には蓄圧や重力等の受動的な手段を使用する。PCCSは、次の四つの主要なサブシステムで構成されている。

#### ① 1次余熱除去システム(PDHR)

PDHR(Primary Decay Heat Removal System)は、二つのループによって構成された余熱除去システムである。一つ目のループは、1次冷却材を直接冷却するもので、1次冷却材から二つ目のループに熱を放出する。二つ目のループは、アンヌラーリザーバーに熱を放出する。

#### ② 2次余熱除去システム(SDHR)

SDHR(Secondary Decay Heat Removal System)は、余熱除去のための代替手段である。SDHRは、浮力を利用して蒸気を蒸気発生器からアンヌラーリザーバー内の熱交換器に送り、そこで蒸気を凝縮させて除熱するシステムである。その後、凝縮した水は蒸気発生器の2次冷却水側に戻る。

#### ③ 自動減圧システム(ADS)

ADS(Automatic Depressurization System)は、密閉されたCS内で1次冷却系統の圧力を安全に下げるように設計された自動減圧システムである。

#### ④ 受動炉心注入システム(PCMWS)

PCMWS(Passive Core Makeup Water System)は、ADS作動による1次冷却系統の圧力低下に伴い、蓄圧タンクと原子炉補給水タンクから、段階的に安全注入を行うシステムである。

#### (2) 受動格納容器除熱システム(PCHR)

PCHR(Passive Containment Heat Removal system)は、鉄筋コンクリート製のCESと、CESで囲まれた鋼鉄製のCSで構成されている。CESは、外部事象からCSを保護する。CESの壁は、大型の民間航空機やその他の危険からの衝撃に耐えるように設計され、非常に頑丈な鉄筋コンクリートで構成されている。CSは放射性物質の環境への放出を防ぐことに加えて、大型の受動熱交換器としても機能する。CSは全高の約半分が地面に埋められており、外部の危険に対する保護を最大化するとともに、重要な設備に対する地震による影響も抑制する。

PCHRは、CS内を受動的に冷却する。CS内に蒸気が噴出したとき、蒸気はCSの内壁を通じてアンヌラーリザーバーへ熱を逃がして凝縮する。大きな熱伝達領域によって、ほぼ瞬時にアンヌラーリザーバーへの除熱が実現する。その後、アンヌラーリザーバー内の保有水の蒸発によって外部環境へ熱を放出する。アンヌラーリザーバー内の大量の保有水は、補充なしで3か月以上にわたってCSから除熱するのに十分であり、PCHRを空冷に移行させた後は、安全な余熱除去を無期限に保証する。

CSには、原子炉に加えて使用済燃料プールが収容されている。使用済燃料プールは開放型のプールであり、ポンプによる動的な冷却が失われた場合にも、プール表面から

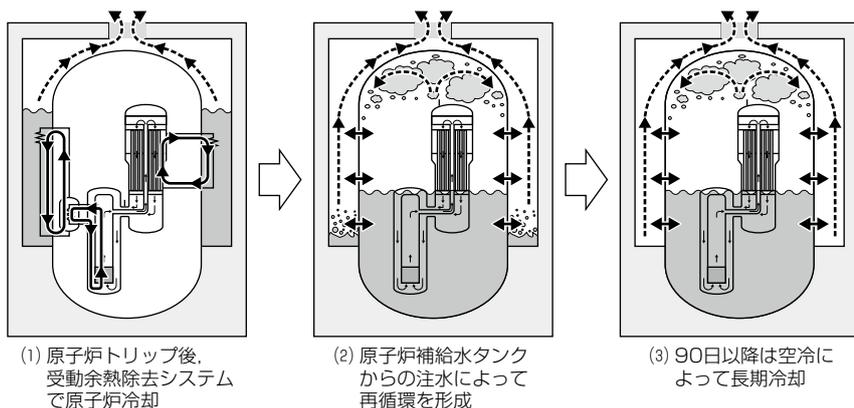


図3. 受動的安全システムの挙動例

の蒸発とCSによる受動的冷却によって崩壊熱を除去できるように設計されている。これによって、原子炉内の燃料と同じように使用済燃料を安全かつ無期限に冷却できる。

### 2.3.3 受動的安全システムの挙動例

次に、先に述べた受動的安全システムによる仮想的な事故(LOCA)に対するプラントの挙動例を述べる(図3)。

- (1) 原子炉トリップ後、受動余熱除去システム(PDHR及びSDHR)によって原子炉を冷却する。
- (2) ADSによって1次冷却システムの圧力を安全に下げて、蓄圧タンクと原子炉補給水タンクから段階的な安全注入を実施する。安全注入された補給水とPCHRによる受動冷却によって、CS内での長期の再循環を形成する。
- (3) アニュラーリザーバーの保有水によって数か月にわたってCSから余熱除去を行う。保有水がなくなる段階では崩壊熱が低下しており、プラントは無期限の空冷に移行する。

### 2.4 規制対応

SMR-160は、カナダ原子力安全委員会(CNSC: Canadian Nuclear Safety Commission)による許認可前設計審査第1段階(Vendor Design Review Phase 1)を受審した。2020年に審査を完了し、SMR-160の設計がCNSCの規制要件を全般的に満たしているとの評価を得た。

## 3. 米国エネルギー省支援プログラムに選定

SMR-160は、米国エネルギー省(DOE: Department of Energy)原子力局の先進的原子炉実証プログラム(ARDP: Advanced Reactor Demonstration Program)に選定された。ARDPは、米国企業が先進型炉を実証するのを支援するもので、支援上限は40億ドルである。

ARDPには三つのプロジェクトがあり、SMR-160は表2の(2)で選定され、DOEは設計、エンジニアリング、許認

表2. ARDPの三つのプロジェクト

(1)	Advanced reactor demonstrations : 今後5~7年での稼働を目指す2炉型を選定 Risk reduction for future demonstrations : 先進的原子炉実証プロジェクトよりも約5年先の実用化を目指して、多様な新型炉概念を対象に、技術的なリスク課題への対応を支援することを目標に5炉型を選定
(2)	Advanced reactor concepts 2020 : 将来実証リスク低減プロジェクトよりも約5年先の実用化を目指す可能性のある新型炉を対象に、安全性、経済性、運転性の技術開発を支援することを目標とする3炉型を選定

可等へ7年間で総額1億1,600万ドルの支援を発表した。

Holtec International社はニュージャージー州のオイスタークリークサイトに実証炉の建設を計画しており、2029年ごろの運転開始を目標に、米国原子力規制委員会(NRC: Nuclear Regulatory Commission)の許認可と設計・開発を加速させる予定である。

## 4. 当社の取組み

当社は2016年にHoltec International社と共同開発契約を締結し、初期段階からSMR-160の開発に参画している。当社は、SMR-160開発のうち、Holtec International社が設計するプラントシステムの制御・保護機能を実現する計装制御システムの設備構成等の設計を担当している。

計装制御システムの開発に当たっては、(1)デジタル技術の適用範囲最大化による小型・高信頼を実現した制御・保護設備、(2)自動化によって操作が少なく監視主体になる運転に最適化した監視操作設備等の設計を進めている。

今後は設備設計の詳細化を進めるとともに、先に述べた米国での初号機(実証炉)建設を目指して、計装制御システムプラットフォームのNRCの審査受審を計画している。

## 5. むすび

SMR-160の特長、特にその安全を実現する受動的安全システムの設計について述べた。また、当社のSMR-160での計装制御システム開発の取組みについて述べた。

当社は、小型モジュール炉の実現、さらにはそれら技術を活用した国内プラントの安全性向上に貢献していくため、計装制御システムの開発に引き続き取り組んでいく。

### 参考文献

- (1) Holtec International : Holtec's Small Modular Reactor  
<https://holtecinternational.com/products-and-services/smr/>
- (2) IAEA Advanced Reactors Information System : Advances in Small Modular Reactor Technology Developments 2020 Edition (2020)  
[https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf)