

高経済性中小型軽水炉の開発

Conceptual Design of Small and Medium Power Reactors

電力需要の伸びの鈍化とともに、需要予測も難しくなりつつあるという情勢下で、電力網の大きさによらず短期需要変化にきめ細かく対応できるものとして、中小型原子力発電プラントへの期待が高まってきている。

BWRの技術進歩を踏まえてABWR型と組み合わせ、容量シリーズ化として出力60万kW、30万kWを想定し、中小型化しながら経済性をいかに維持向上させるか、また中小型原子炉に持たせることができる固有の特性とはどのようなものがあるかに目標を設定し、設計概念の開発を行った。

開発に当たっては、これまで培ってきた軽水炉技術を最大限に活用し、設備単純化による経済性の確保、小型炉特有の特性を生かした安全性の向上を図ることとした。

その結果、短尺燃料を用いた自然循環型炉心、自然放熱型格納容器及び蓄圧注入系などの安全設備、並びに短期間で建設可能な階層の少ないコンパクト建屋、2年連続運転可能などの特徴を備えた中小型軽水炉設計概念を確立した。

三木 実* Minoru Miki
堀内哲男** Tetsuo Horiuchi
秋田 実** Minoru Akita
新野 毅** Tsuyoshi Niino

1 緒 言

軽水炉による原子力発電技術は、これまで、よりいっそうの経済性を確保するという観点から、出力の大型化に向けて技術開発がなされてきている。

しかし、もう一方では近年の世界的な規模での低経済成長・電力需要の伸びの鈍化を背景に、小出力で電力需要の増大にきめ細かく対応できるもの、資金投資効率の向上を図ることができるものとして、中小出力の軽量の軽水炉プラントへの期待も高まってきている。

特に米国では、大型原子力発電プラントの新規受注がなく原子力技術が行き詰まりを見せていることから、いわゆる1990年代の第二世代原子炉として中小出力で、より安全性が高く従来のものとは視点を変えた経済的な原子炉の実現へ向けて民間が開発に取り組み、国もこれを支援しようとしている。

このような国内外の状況を踏まえて、現行の大型・標準化原子力発電路線とは別に、中小出力で経済的に大型炉と競合できることを目標として、従来から蓄積してきた中小型炉技術を取りまとめ中小型軽水炉の概念設計を行った。この中小型軽水炉構想は、大型改良型軽水炉との組み合わせで、軽水炉出力シリーズ化対応の一環と位置づけ、特に60万kW、30万kWを対象としたものである。

2 開発の背景とねらい

2.1 開発の背景

我が国での中小型軽水炉構想の開発は、昭和56年から検討されており、通商産業省中小型軽水炉開発利用システム調査

検討会で、多目的中小型軽水炉の構想評価がなされている。その中で日立製作所は、炉出力60万kWの電気・蒸気供給型の原子炉構想設計を実施してきている。

また、ほぼ同時期に電力会社共同研究も実施され、日立製作所は炉出力27万kWの都市への熱供給を目的とした熱供給専用炉の構想設計と評価を行っている。

更に、昭和59年度からは、発電用軽水炉として電気出力60万～30万kWを念頭に、高経済性・高安全性を目標とした軽水炉構想の開発を独自に進めて、昭和61年に構想設計を取りまとめている。

2.2 開発のねらい

中小型軽水炉の開発を考えた場合、その最大の課題は安全性を確保した上での経済性の追求であろうと考えられる。すなわち、中小型原子力発電プラントの経済的な成立性として、化石燃料発電プラントと同等か、若しくはそれ以上の経済性を持っていること、また大型原子力発電プラントの持っている経済性にできる限り近づくことが必ず(須)条件であると言える。

一方、安全性は、中小型化したことによる原子炉の固有の特徴を生かした工夫により向上することが肝要である。

以上の認識のもとに、新しいBWR(軽水炉沸騰水型原子炉)として中小型炉を開発するに当たり、中小型軽水炉として必要なプラント特性の分析を行い、そのニーズを次のようにまとめた。

(1) 耐震設計条件などプラント立地点の固有条件に左右され

* 日立製作所日立工場 工学博士 ** 日立製作所日立工場

表1 設計の基本的考え方 中小型軽水炉に要求されるニーズ、これに対応するための技術の基本コンセプト、及びこれによって得られる効果を示す。

ニ ー ズ	技術の基本コンセプト	コンセプト効果			
		安 全 性	運 転 性・ 保 守 性	建 設 工 期 短 縮	経 済 性
1 立地の容易性 (サイティングフリー)	(1) 耐震制約フリー (炉心標準化) (建屋標準化)	◎	—	◎	◎
2 中小型炉による固有の安全特性 ・系統の単純化 ・安全特性の向上	(1) 炉緊急停止時運転員操作不要 (外部電源不要)	◎	○	◎	◎
	(2) 炉自然循環冷却	◎	○	◎	◎
	(3) 自然放熱型原子炉格納容器	◎	—	—	○
	(4) 炉心水没	◎	—	—	—
3 運転管理の容易性	(1) 系統の単純化・静的化	○	◎	—	◎
	(2) 定期検査期間：30日以下	—	◎	—	◎
4 低発電コスト	(1) 建設物量低減	—	—	◎	◎
	(2) 建設工期短縮	—	—	◎	◎
	(3) 長期連続運転2年以上	—	◎	—	◎

注：◎印(効果大)，○印(効果あり)

- ることなく、あらゆる立地点に標準設計が適用できること。
- (2) 小型炉とすることによる固有の安全特性が導入できること。
- (3) 運転管理の容易性を確保することができること。
- (4) 単位出力当たりの建設コストの低減、及び運転費の低減

により、低発電コストを確保できること。

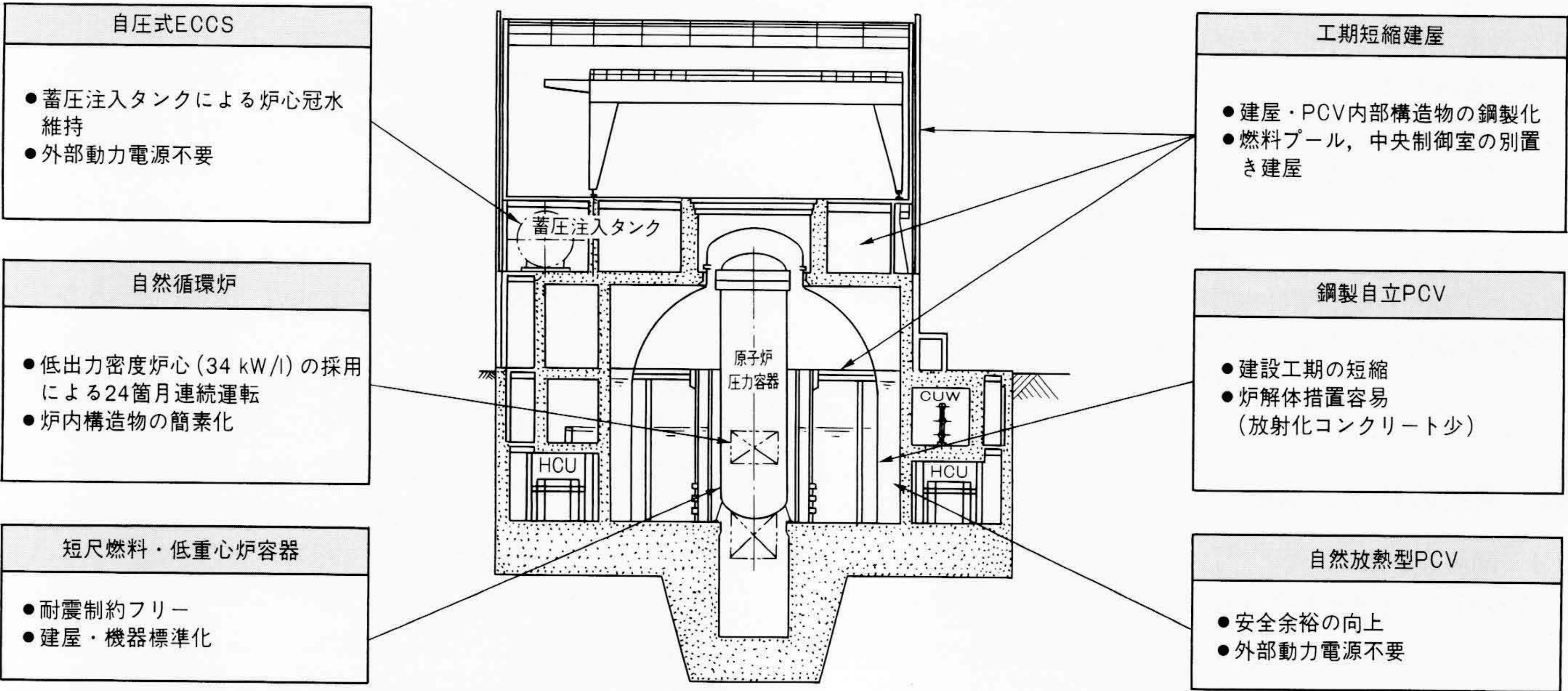
これらのニーズに対応する技術の基本コンセプト、及びそれによって得られる効果を表1に示す。同表に示した技術コンセプトを適用することによって、プラントとしての安全性の向上、運転性・保守性の向上、建設工期の短縮、発電コストの低減を図ることができる。なお、技術コンセプトの適用に当たっては、これまでの軽水炉技術を最大限に活用することを基本としており、新たな技術開発の必要性及び許認可上の制約が生じないように配慮している。

3 プラント概念と技術的特徴

3.1 プラント概念

図1にプラント構成概念を示す。これらには次のような特徴を持たせている。

- (1) 建屋の標準化
- 短尺燃料(有効発熱長：3.1 m)を採用すること、また原子炉圧力容器を下方に配置し、低重心化することによって耐震設計上の制約を回避しており、炉心及び建屋設計の標準化を図った。
- (2) 建設工期短縮
- 鋼製原子炉格納容器の採用、鉄骨を多用した建屋構造及び建屋自体のコンパクト化によって、建設工期を大幅に短縮している。
- (3) 蓄圧式炉心冷却設備の採用
- 蓄圧タンク方式による炉心冷却設備を採用し、炉心冠水維持を図るとともに、系統設備を単純化し非常用動力電源設備の容量を大幅に低減している。また、本設備機能により事故事象に対し、運転員の操作に頼ることなく迅速に処理(Quick Quench)できる設計としている。
- (4) 自然循環炉の採用
- 炉心からの熱移送は、現行大型炉の強制循環方式ではなく



注：略語説明 ECCS(非常用炉心冷却系)，HCU(制御棒水圧駆動ユニット)

図1 プラント構成概念 本図に示す基本特徴により、中小型軽水炉としての経済性及び安全性の向上を確保している。

自然循環方式とし、再循環系のジェットポンプ、外部ポンプ、外部再循環配管系をなくすとともに、M(電動機)-G(発電機)セットなどの駆動電動設備をなくし、炉心冷却系及び炉内構造物の単純化を図っている。また、低出力密度炉心の採用により24箇月サイクルの運転を可能とし、設備利用率の向上を図っている。

(5) 自然放熱能力の確保

事故時に格納容器内に放出された熱エネルギーは、圧力抑制室水で長期にわたり吸収可能(事故後1日程度)にするとともに、更に長期にわたる場合は原子炉格納容器の外側に設置した外周プール水の自然蒸発によっても除去可能な設計とし

表2 プラント基本諸元 同一出力規模の現行BWRに比較し、建屋容積の低減・建設期間の短縮及び運転サイクル期間の延長(時間稼働率の向上)が図られている。

項 目	中小型軽水炉	現行BWR
炉 型	自然循環BWR	強制循環BWR
熱 出 力	1,800 MW	1,800 MW
電 気 出 力	600 MW	600 MW
原子炉建屋	幅47 m×奥行48 m×高さ45.5 m	幅71 m×奥行67 m×高さ56 m
タービン建屋	幅47 m×奥行62 m×高さ37.5 m	幅55 m×奥行85 m×高さ38 m
安全設備	自然放熱型格納容器 低圧蓄圧注入方式ECCS	冷却方式格納容器 ポンプ注入方式ECCS
建設期間*	32箇月	45箇月
運転サイクル	24箇月	12箇月

注：略語説明など BWR(沸騰水型原子炉)
* プラントの特殊な立地条件によらない標準工程を示す。

ている(外周プールに常時水を入れるか、事故後に1日以内に水を入れるかは運用上のオプション)。このような設備対応により、設計規準事故だけでなく過酷事故に対しても、より十分な時間的余裕をもって炉心冠水・冷却が対応のできる設計(Safety Stay)としている。

3.2 プラント構成

原子炉設備及びタービン設備の概要を図2に示す。ここでは電気出力60万kWの設計を中心に述べるが、プラントとしての基本諸元は表2に示すとおりである。

(1) 原子炉設備の特徴

原子炉系の設備構成を表3に示す。前述のように自然循環

表3 原子炉系の設備構成 冷却材再循環の削除、安全設備の単純化により、大幅に設備簡素化が図られている。

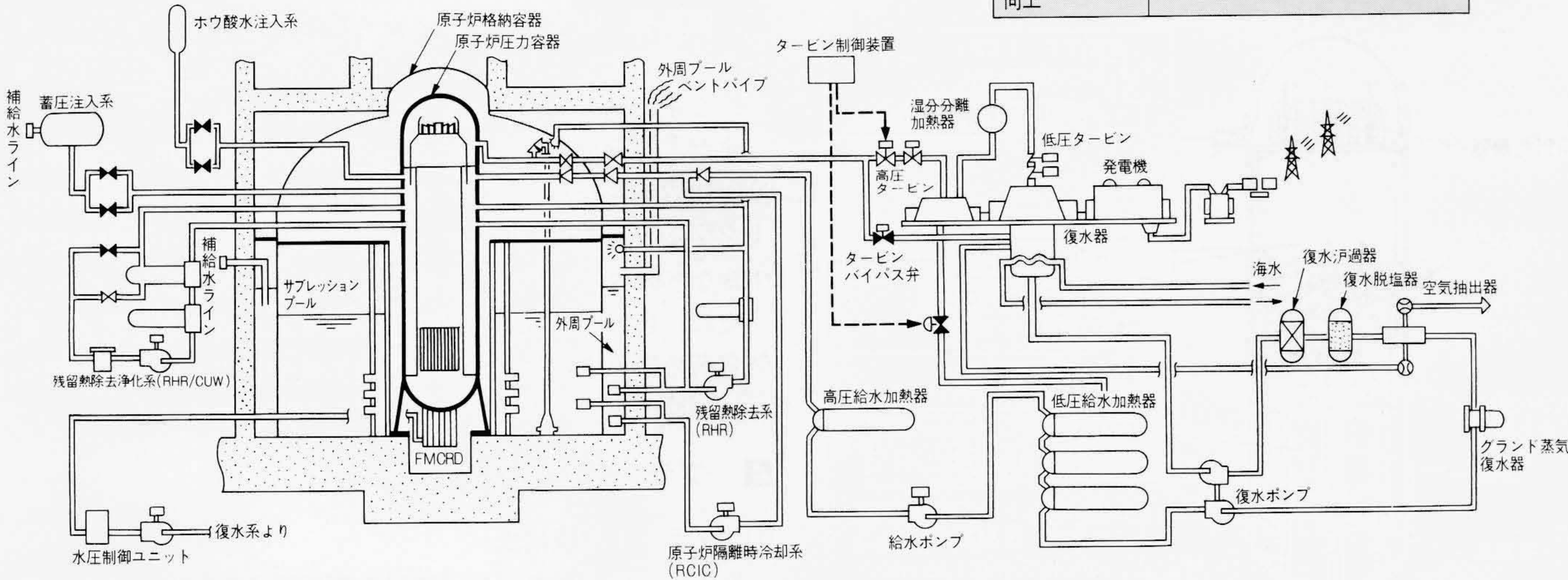
項 目	中小型軽水炉	現行BWR
主 蒸 気 系	主蒸気管700 A×2本	500 A×4本
給 水 系	400 A×2	400 A×2
冷却材再循環系	なし(自然循環)	ジェットポンプ方式
E 高圧スプレイ系	なし	1系統
C 低圧スプレイ系	なし	1系統
C 低 圧 注 入 系	なし	3系統
S 冠 水 系	蓄圧注入タンク 2基	なし
隔離時冷却系	1系統	1系統
残留熱除去系	1系統	2系統
冷却材浄化系	1系統(RHR共用)	1系統
ホウ酸水注入系	蓄圧注入方式	ポンプ注入方式

原子炉系の特徴

システム構成の簡素化	●自然循環炉の採用 (再循環システムの削除)
安全機能の向上	●自然放熱型格納容器 ●蓄圧注入方式ECCS

タービン系の特徴

システム構成の簡素化	(1) 長翼タービンの採用 (2) 高圧・低圧タービン各1車室 (3) 復水器1胴形 (4) 給・復水サイクル1系列
機器の小型化	●復水ポンプリエントリー型
負荷追従性能の向上	●抽気量制御などの新制御方式採用



注：略語説明 ECCS(Emergency Core Cooling), RHR/CUW(Residual Heat Removal/Cleanup Water), FMCRD(Fine Motion Control Rod Drive)
RHR(Residual Heat Removal), RCIC(Reactor Core Isolation Cooling)

図2 原子炉設備・タービン設備の概要 自然循環型炉心、自然放熱型格納容器及び蓄圧注入方式安全設備の採用により、原子炉設備は大幅に単純化・簡素化が図られている。また、タービン設備も長翼タービンの採用、給・復水サイクルの1系列化により簡素化されている。なお、静的蒸気復水器の設置もオプションとして可能である。

炉の採用によって冷却材再循環系を削除していることから、原子炉設備は大幅にシステム構成の簡素化が図られている。常用設備としてはタービン系と連絡するための主蒸気系、給水系及び炉水を浄化するための炉水浄化系などの補助システムから構成されている。したがって、原子炉系ではプラント通常運転時に必要とする動力電源は非常に少なく、所内負荷率を考える上では無視できるほどに低減されている。

原子炉圧力容器の内部構成を図3に示す。炉内構造物は炉心、ライザ及び蒸気乾燥器だけで構成されており、現行炉で設置している汽水分離器は、自然循環炉の特性を生かし設置していないため、非常に単純化されている。原子炉運転圧力は、現行BWRと同じく7 MPaをベースとし、短尺炉心の採用、ライザの設置により、安定性を確保しながら熱出力をできる限り向上させるように考慮を払っている。また、炉心出力密度は長期連続運転をねらって34 kW/lを採用している。

安全設備の特徴は、自然放熱型格納容器を採用したほかに、非常用炉心冷却系に関してポンプを用いた現行炉の注水方式に代わり、低圧力の蓄圧注水方式を採用することによってシステムの単純化、静的化を図り、安全機能、保守性及び信頼性を向上させている点である。

また、プラント通常停止時に炉心崩壊熱を除去するための停止時冷却系についても、二系統設備のうち一系統は冷却材浄化系と共用化を図り設備容量の低減を図っている。

図4に安全設備の性能評価の一例を示すが、配管破断を想定した場合でも炉心は常に冠水状態に維持されており、燃料被覆管の温度上昇も生ぜず高い安全性が確保されている。

(2) タービン設備の特徴

中小型炉発電プラントでのタービン設備でも、システム構成の簡素化を図り設備容量低減を行っている。表4にタービン系の設備構成を示すが、ここでは電気出力60万kWに着目し、従来、大容量プラント用に開発を進めてきた長翼タービ

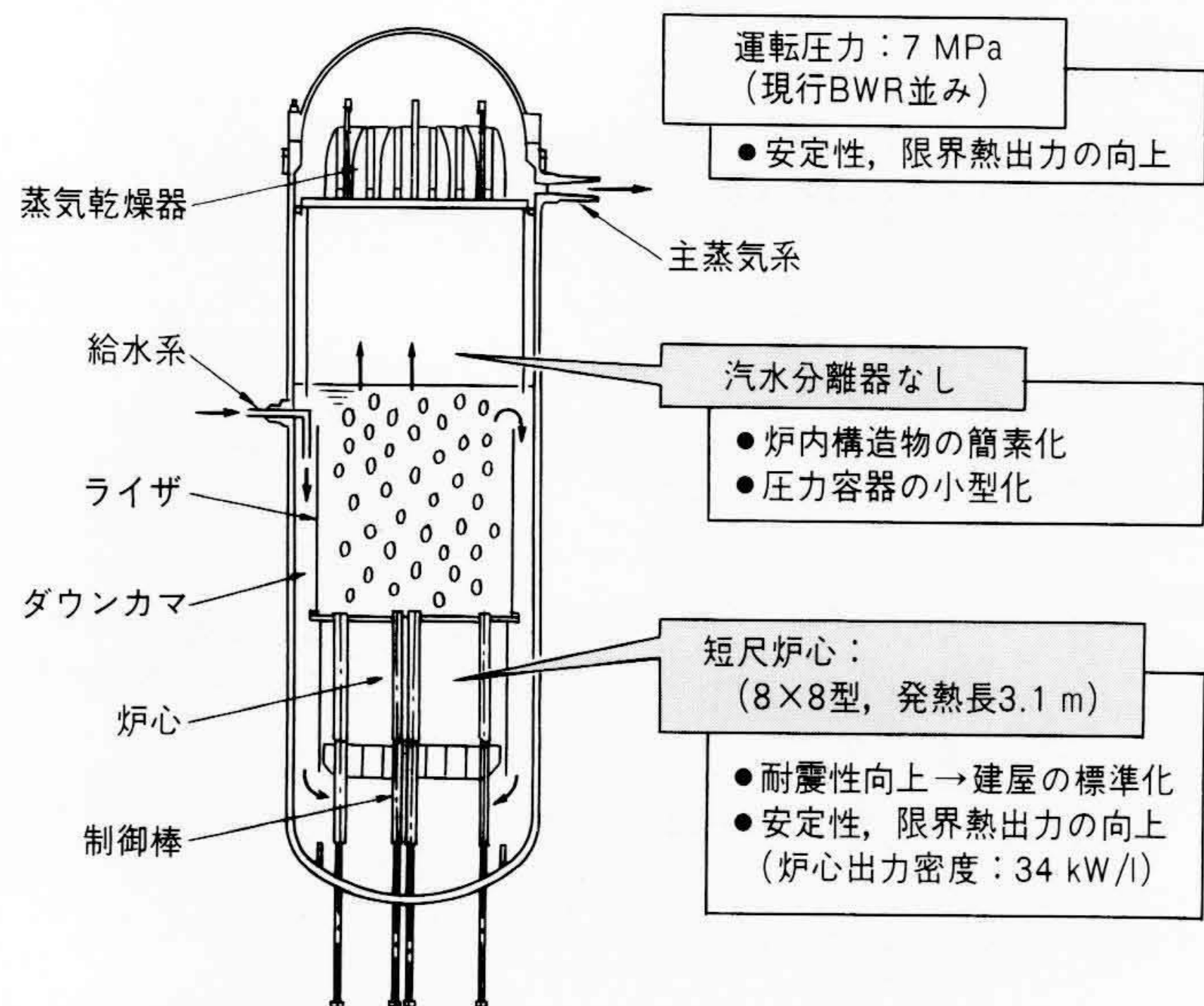


図3 炉内構造物の概要と特徴 炉水循環のためのジェットポンプ及び汽水分離器がないことから現行BWRに比べ大幅に簡素化・単純化されている。

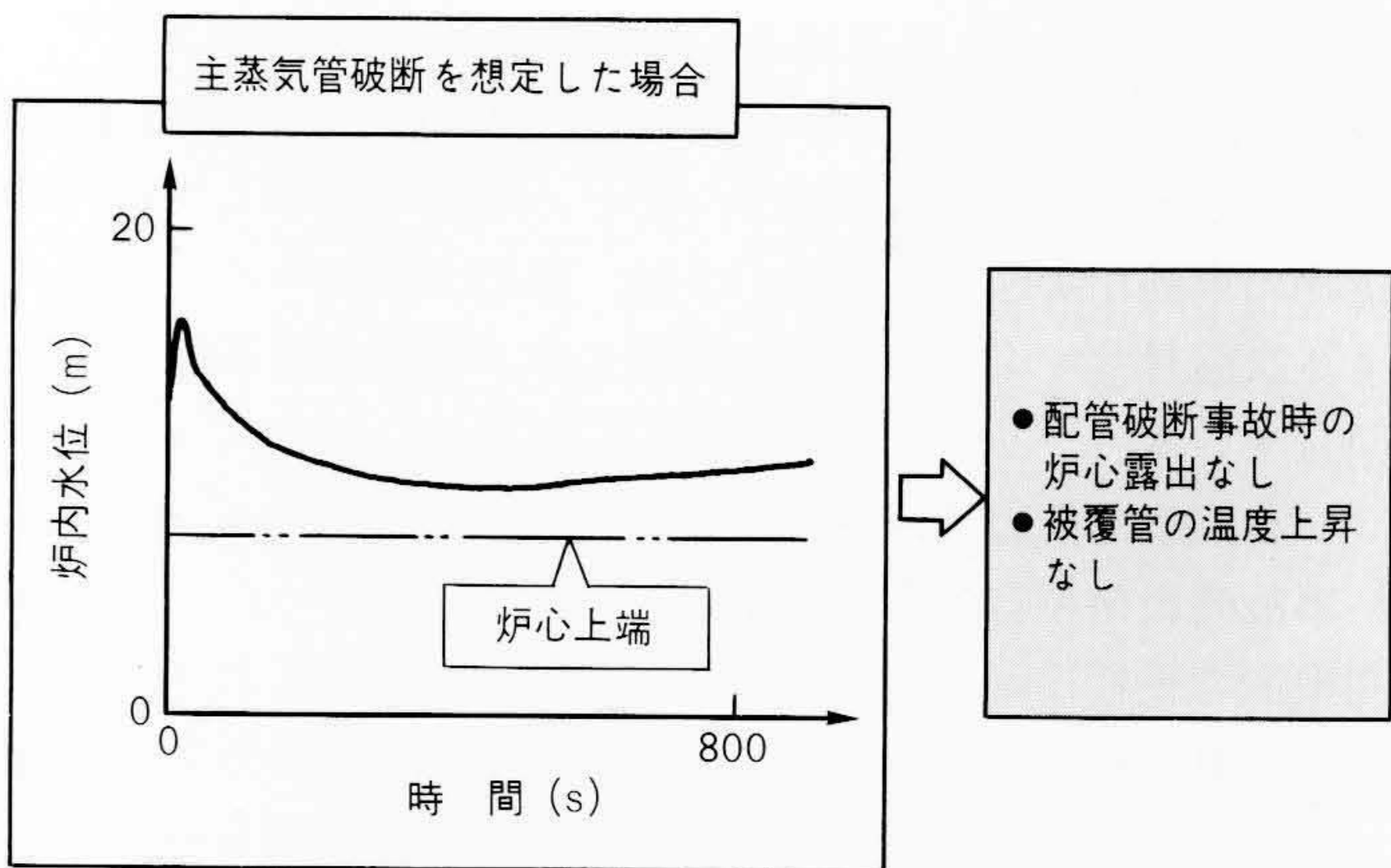


図4 安全設備の性能評価 主蒸気管破断事象を想定しても、蓄圧注入系の作動により炉心は冠水状態に維持され、安全性が確保されている。

表4 タービン系の設備構成 長翼タービンの採用により、高压タービン・低压タービンの各1車室化、復水器及び給水ヒータの1系列化が図られており、簡素化されている。

項 目	中小型軽水炉	現行BWR
タービン型式	TCDF-52	TC4F-38
湿分分離加熱器	1段再熱式	非再熱式
主 弁 類	バタフライ弁型中間弁	バタフライ弁型中間弁
ヒータ構成	高 圧	1 段・1 系列
	低 圧	3 段・1 系列
復 水 器	1 胴式	2 段・2 系列
復 水 ポ ン プ	リエントリー型	4 段・2 系列
		単独型

ンの適用を図った。低压タービン最終段翼として52インチ翼を採用することによって、高压タービン・低压タービン各1車室で対応できる。

従来、同等の電気出力に対する原子力用タービンは低压タービン2車室の設計であったが、これを1車室にするとともに、復水器、給水ヒータなどから構成される給・復水サイクルを1系列化して大幅な設備の簡素化を図った。なお、2車室、2系列化もオプションとして可能である。

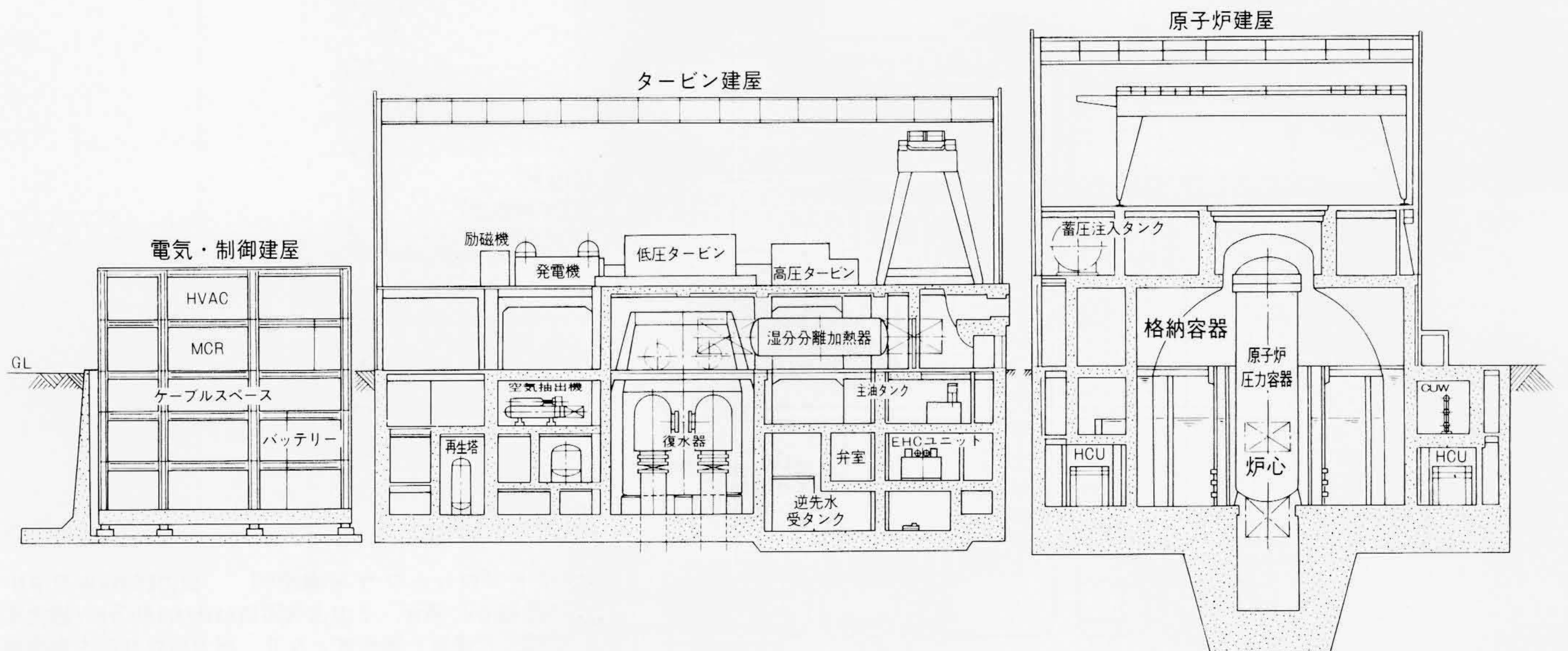
また、湿分分離加熱器には一段再熱方式の採用、中間弁には圧損の小さなバタフライ弁の採用などによって熱効率の向上を図るとともに、復水ポンプ形式もリエントリー型を採用するなど機器の小型化、軽量化にも設計上の配慮をしている。

更に、自動周波数調整運転及び発展途上国対応を考え、電気負荷の早い変動にはタービン抽気調整弁により出力調整を行い、原子炉への影響を小さくする配慮もしている。

4 プラント配置及び建設性

(1) プラント配置構成

原子炉建屋及びタービン建屋の配置構成を図5に示す。原子炉建屋は、圧力容器及び格納容器サプレッションプールをできる限り下方に配置することによって低重心化を図っている。また炉心はサプレッションプール水面より下方になるように配置しており、仮想事故などの際にも炉心は常に冠水状



注：略語説明 MCR(中央制御室), HVAC(換気空調設備)

図5 プラント配置構成図 原子炉建屋・タービン建屋とも低階層化，鉄骨構造化及びコンパクト化が図られており，建設物量の低減，建設工期の短縮が図られている。

態に維持されるよう配慮している。

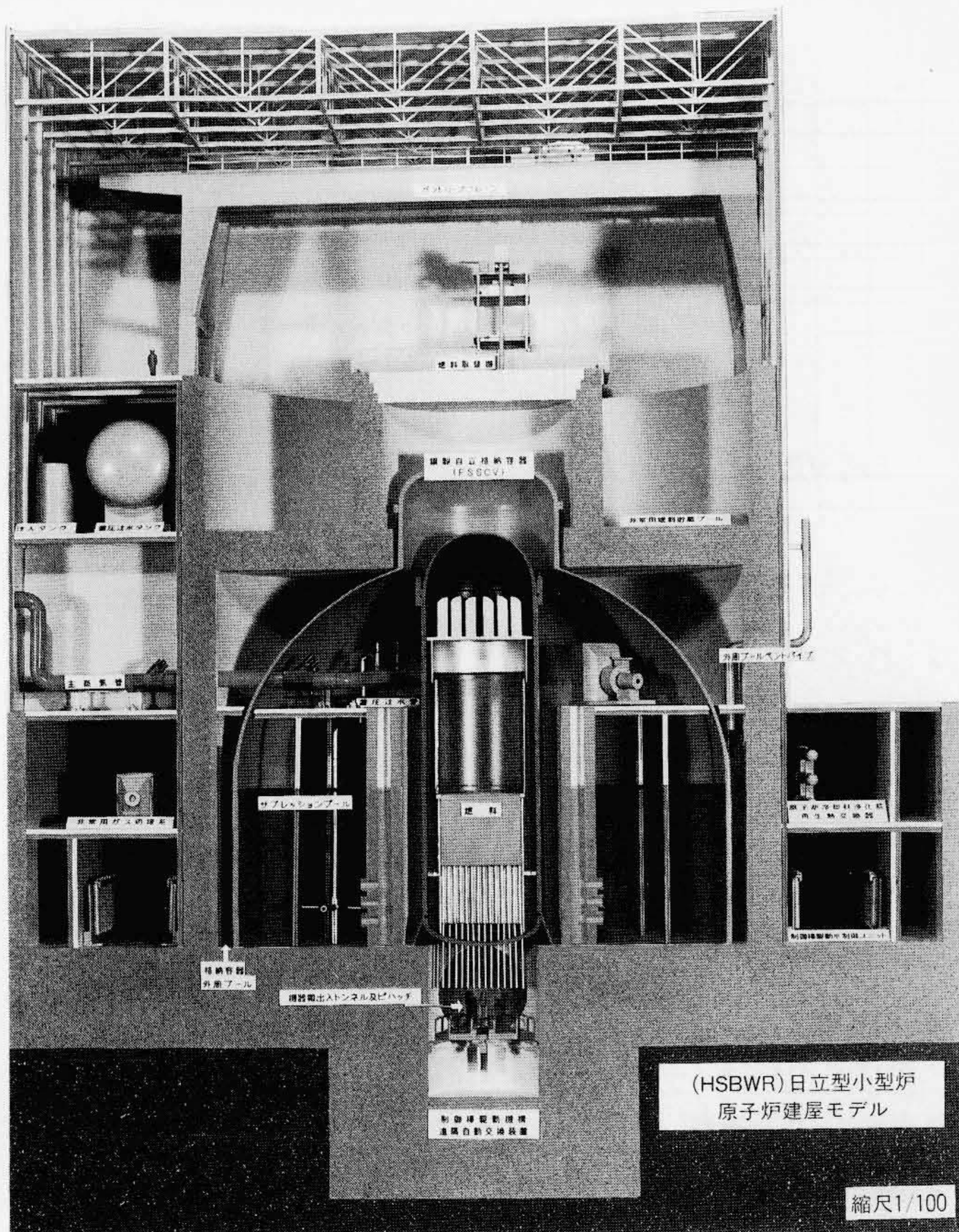


図6 原子炉建屋構造モデル 原子炉圧力容器及び格納容器サプレッションプールは下方に配置され，建屋の低重心化が図られている。また，建屋耐震設計上の接地率は十分確保されており，安定した建屋構造となっている。

前述のように，プラント設備が非常に簡素化され，かつ格納容器が小型になっていることにより，建屋も4階層と低くコンパクト化されている。原子炉建屋は横幅47 m，高さ45.5 mに収まっている。建屋耐震性を考えた場合，建屋接地率がどれだけ確保されているかが重要であるが，本形状に基づく評価結果では，目安値75%以上に対し約85%であり耐震設計上問題のないことを確認している。本構想に基づく原子炉建屋構造モデルを図6に示す。

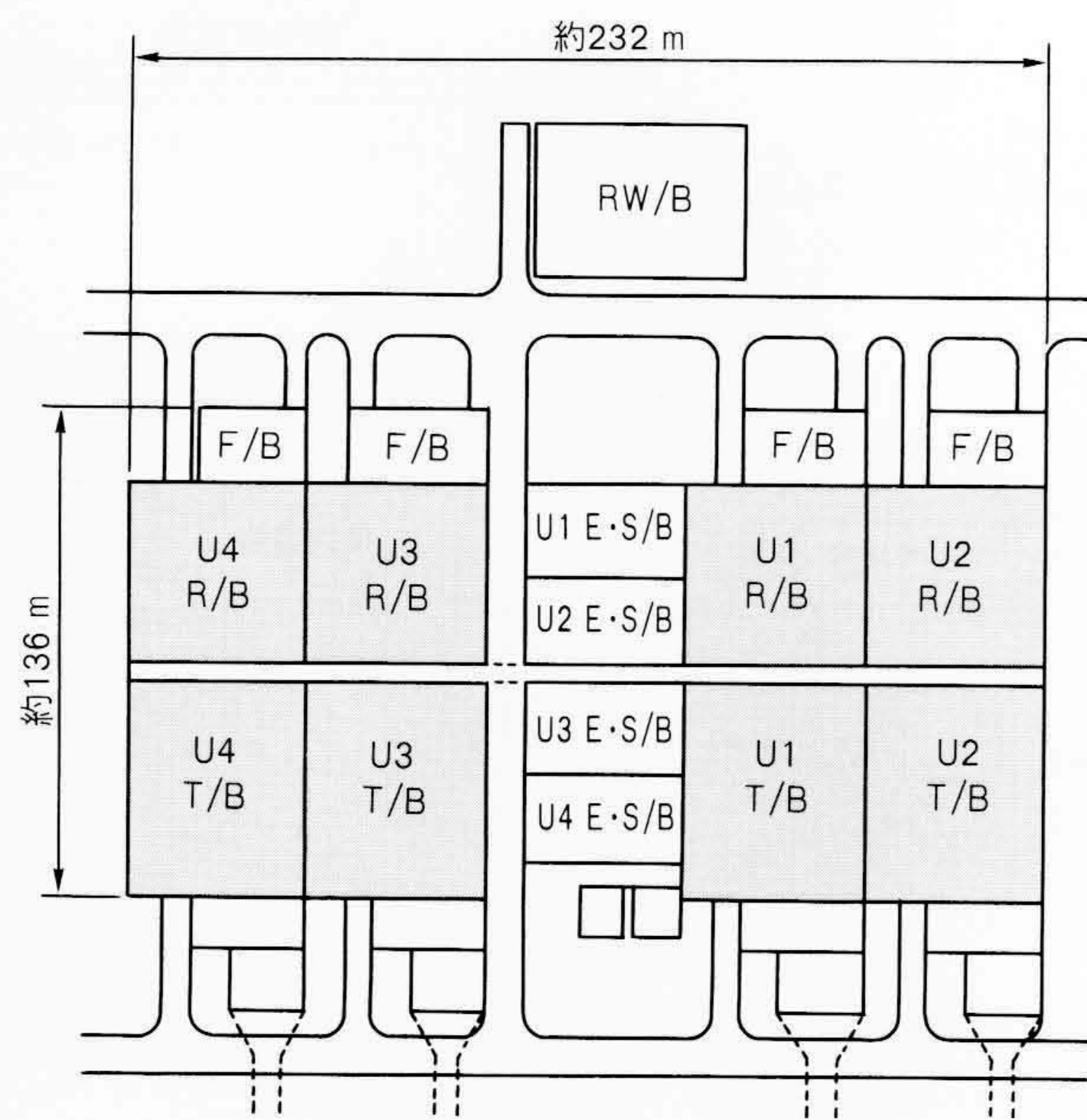
また，タービン建屋についても，低压タービン1車室・復水器1胴であることにより大幅にコンパクト化されている。

現行の同出力プラントと建家容積を比較すると，本設計では原子炉建屋で約50%，タービン建屋で約60%に低減されている。

以上の建屋配置に基づくサイトプロットプラン構想の例を図7に示す。電気出力60万kWの中小型炉を4基配置した場合でも，その敷地占有スペースは232 m×136 m程度に収まり，これは出力130万kW級の大型炉を2基配置した場合と同等のスペースとなっている。すなわち，電気出力当たりの敷地占有面積は現行炉とはほぼ同等と言える。

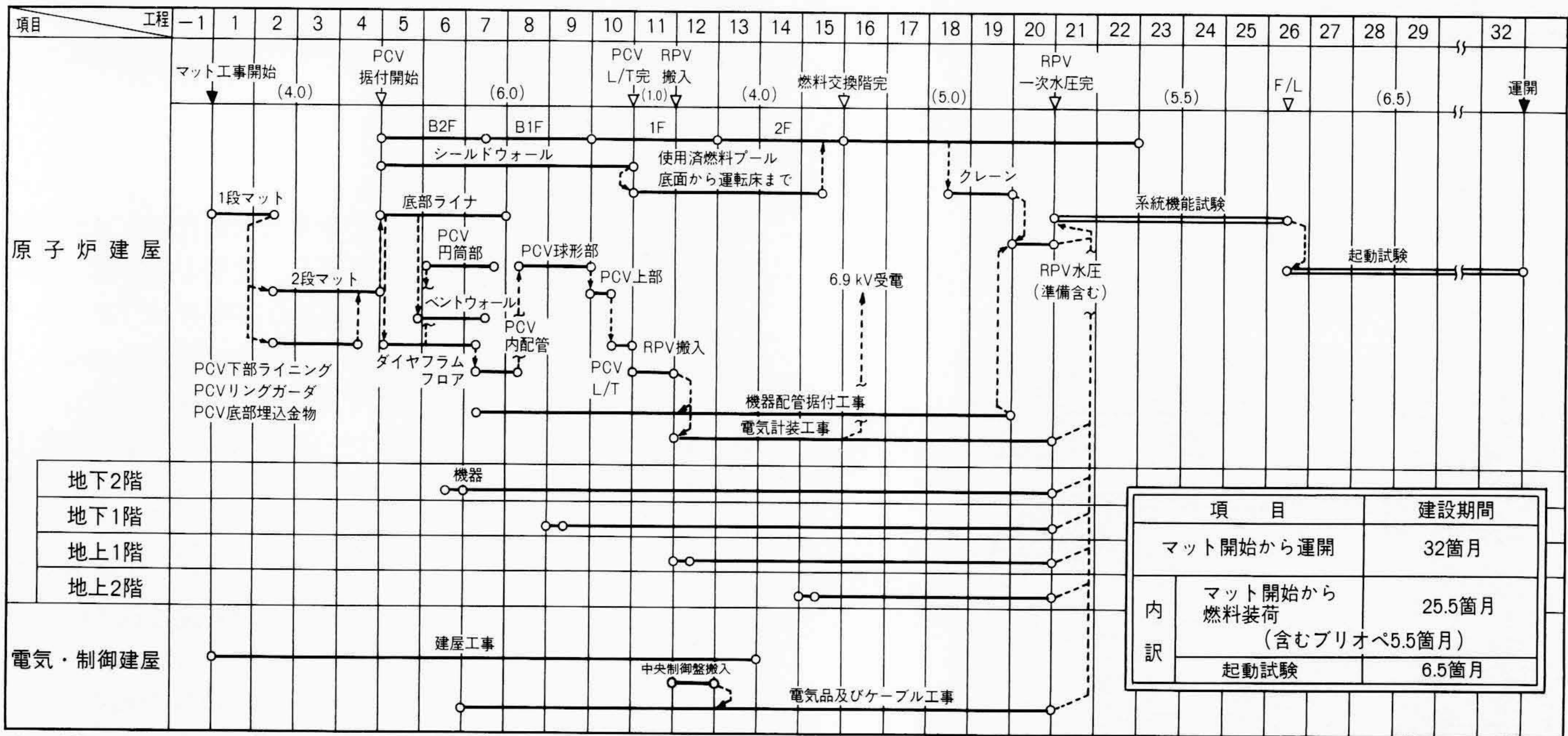
(2) プラント建設性

図5に示した建屋構成のように，本設計では低階層構造建屋であること，原子炉建屋構造壁と格納容器の並進工事が可能であること，鉄骨構造が取り入れられていることなどから，ブロック化工法，モジュール化工法の適用とあいまって大幅に建設工期が短縮されている。図8に示すように，マット工事開始から据付工事完了まで20箇月の短工期を計画している。工事完了から系統機能試験期間として5.5箇月，燃料装荷後の起動試験期間として6.5箇月を見込み，マット工事開始からプラント運転開始に至るまでの総建設期間は，標準的な建設条



注：略語説明
R/B(原子炉建屋)
T/B(タービン建屋)
F/B(使用済み燃料貯蔵建屋)
RW/B(廃棄物処理建屋)
E・S/B(電気・制御建屋)

図7 サイトプロットプラン構想例 出力60万kWの中小型炉を4基設置した場合、その占有面積は出力130万kW級大型炉を2基設置した場合と同程度となり、出力当たりの占有面積は同等となる。



注：略語説明 L/T(漏洩試験), F/L(燃料装荷)

図8 建設工事の詳細 ブロック化工法、モジュール化工法の適用により、マット工事開始からプラント運転開始まで32箇月という短工期を計画している。

件で32箇月の短工期を計画している。

5 結 言

軽水炉による原子力発電プラント出力シリーズ化対応の一環として開発した中小型炉について、その設計概念を述べた。短尺燃料を用いた自然循環型原子炉システム及び自然放熱型格納容器という設計概念により、中小型化に伴う固有の安全性を持たせるとともに、サイト条件に左右されない同一設計の適用を可能とした。また、設置面積も単位出力当たりの比較で、大型炉の設置面積以下が可能な配置構成とすることにより、プラント敷地の利用度を向上させることができた。原子炉系・タービン系の大幅な設備簡素化、及び鉄骨構造を取り入れたコンパクト建屋構造により、建設工期の短縮、

建設設備費の低減、資金投資効率の向上を図ることができ、発電コストの低減に寄与できる。本設計概念は、既成の軽水炉技術によりまとめられており大きな開発確証を必要とする概念はないが、実用化へ向けての検討として、自然放熱型格納容器の概念などについてシミュレーション計算値の確認など基礎的実験を進めている。今後とも、国や電力会社の指導・支援を得ながら、技術的な実証及び設計改善を図ることによって、中小型軽水炉の実用化、適用展開を進めていく考えである。

参考文献

1) 村瀬，外：自然循環BWRの概念検討，昭和62年日本原子力学会年会要旨集，E44～E47