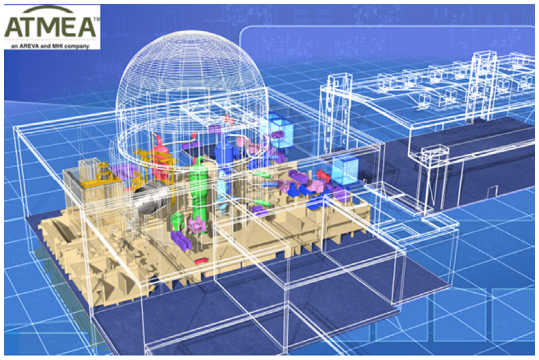
ATMEA™ 1100MWe 級最新3ループ PWR プラント ATMEA1™の概念と特徴

Concepts and Features of ATMEA1™ as the latest 1100MWe Class 3-Loop PWR Plant



田渕 浩三*1 Kozo Tabuchi
武田 正幸*2 Masayuki Takeda
田中 和夫*3 Kazuo Tanaka
今泉 潤一*3 Junichi Imaizumi
金川 孝*4 Takashi Kanagawa

ATMEA1™ は，次世代を担う GenerationⅢ+プラント（最新型軽水炉）として，世界有数の総合原子力プラントメーカである三菱重工業（株）と仏 AREVA 社が合弁で設立した ATMEA™ 社が開発している電気出力 1100MWe 級の3ループ PWR プラントである．ATMEA1™ は，検証された技術に裏打ちされた確かな信頼性，高い運転性能，そして最高レベルの安全性を有するとともに，顧客のニーズに合わせた柔軟な運転性及び幅広いサイトへの適合性を持ち，容易に許認可取得ができるよう配慮されたプラントである．本年度には基本設計を完了し，今後は設計認証，詳細設計への展開，並びに受注活動の更なる推進を図っていく計画である．

1. はじめに

近い将来に原子力発電所の導入計画を持つ多くの国々では，電力需要や送電網容量の観点から電気出力 1100MWe 級の原子力プラントへのニーズが高い．これらの需要に応えるため，世界有数の総合原子力プラントメーカである三菱重工と仏 AREVA 社が合弁で ATMEA™ を設立し，両社の最新技術を統合した3ループ，GenerationⅢ+プラント ATMEA1™ の共同開発を推進している．

ATMEA™ は，ATMEA1™ の開発，販売，許認可対応等の業務を所掌する．両社が保有する最新技術，及び建設・許認可・マーケティング活動の経験を活用し，また両社が保有する設備や設計者を有効に活用することにより，通常よりも短い期間で最新型プラントの開発を進めており，本年度に基本設計を完了させる計画である．

2. ATMEA1™プラントの概要

ATMEA1™ は，電気出力を既設4ループプラント並みの 1100MWe 級とし，これを3ループ構成で達成している．燃料集合体は長尺の 4.2m 燃料を採用し，157体で炉心を構成している．安全系はループ数と整合した3系列の構成とし，各ループに1つずつ系列が接続する独立した系統構成としている．各系列は単独で必要な安全機能を果たす容量で設計されており，信頼性の高いアクティブ設備を主体として高性能蓄圧タンク等のパッシブ設備がこれを補完する設備構成としている．格納容器は実績のあるプレ・ストレスト・コンクリート製（PCCV）とし，大型商用航空機衝突をも考慮した構造設計を採用し，また，計測制御設備には最新のフルディジタル設計を採用し，運転員の負担軽減，誤操作の低減と信頼性向上を図っている．表1に，ATMEA1™ の主要仕様を示す．

*1 原子力事業本部ATMEA1開発室長
*2 原子力事業本部ATMEA1開発室主幹プロジェクト統括
*3 原子力事業本部ATMEA1開発室主席技師
*4 ATMEA 社副 PJ マネージャー

表1 ATMEA1™の主要仕様

	ATMEA1™	備考
電気出力(送電端)	1100 – 1150 MWe	従来に比べ同等の電気出力を10%低い熱出力で達成, 低コスト・使用済み燃料低減に寄与
熱出力	3150 MWth	
燃料集合体数/有効長	157 / 4.2m	標準仕様
1次系ループ構成	3ループ	1ループ当たりの出力は, 最新プラント(APWR, EPR™)並み
安全系構成	3系列構成	信頼性の高い動的システムに一部静的システムを組み合わせ
蒸気発生器	アキシャルエコノマイザ付	実績のある高効率設計
主蒸気圧	7.3 (MPa)	世界最高水準
熱効率(送電端)	35 – 37 %	サイト条件に依存
格納容器型式	プレ・ストレスト・コンクリート製	航空機衝突に耐え得る設計

3. ATMEA1™の特長

ATMEA1™ の特長は, ①検証された技術に裏打ちされた確かな信頼性, ②高い運転性能, ③GenerationⅢ+プラントとしての最高レベルの安全性, の3点に集約される. 以下にそれぞれの特長について説明する.

3.1 検証された技術に裏打ちされた確かな信頼性

三菱重工と AREVA 社では合わせて130基以上の原子力発電所の設計・建設経験がある. この中で得られた技術・システム・機器を用い, 両社の最新プラントであるAPWR及びEPR™の技術の粋を統合して, ATMEA1™の設計を実施している.

設計にあたっては, 米国の規制, 規格・基準, 及び ICRP(国際放射線防護委員会)要求に従い, さらに日仏の規制も考慮して設計しており, また, 2008 年6月には IAEA(国際原子力機関)より, ATMEA1™の概念設計が IAEA の基本安全原則並びに設計・安全審査に関する主要安全要求事項を適切に反映しているとの評価結果を受領している.

これに加えて, シビアアクシデント(炉心溶融事故)対応, 航空機衝突防護等, 将来プラントに対し欧米で要求される最新の規制動向に対しても, 実績を有する, あるいは検証された技術で対応するよう考慮した設計としている.

このように, 最新でありながら充分に検証された技術を採用することにより, 信頼性が高く, 世界中で許認可取得が容易なプラントを実現している. 以下に特徴的な技術について説明する.

(1) 中性子反射体

中性子反射体は, 三菱重工の APWR や AREVA 社の EPR™ にも採用されている構造である. 炉心を取り囲むステンレス鋼製のリングブロックを設置し, 原子炉容器への中性子照射量を低減することによる長寿命化と信頼性向上を図りつつ, 中性子の有効活用により燃料経済向上に寄与する設計である. また, リングブロックをタイロッドにより締結することにより高照射領域からボルトを排除することで, 保守作業量の低減及び信頼性/稼働率向上を図っている.

(2) エコノマイザ付き蒸気発生器

エコノマイザ付き蒸気発生器はフランスでこれまで採用されている実績のある構造である. 蒸気発生器への給水を, 温度が比較的低い伝熱管側へ伝熱管と並行な流れとなるよう選択的に供給することで1次系／2次系間の温度差を確保して熱交換効率を向上し, 主蒸気圧力を増加させてプラント熱効率の向上を実現している. 図1に, エコノマイザ付き蒸気発生器の図を示す.

(3) 上部挿入方式の炉内核計装

炉内核計装を原子炉容器の上部から挿入し, 原子炉容器の底部貫通ノズルを削除して信頼性の向上を図る構造を採用している. これは三菱重工の海外向け最新プラント, AREVA 社のプラントでも採用されている技術である. 常時炉内の出力分布を正確に計測することで, 適切な運転余裕をもって様々な要求に合わせた運転を行うことができる設計である. 検出器のガイドにも実績のある案内構造を採用し, 保守作業量を最小化している.

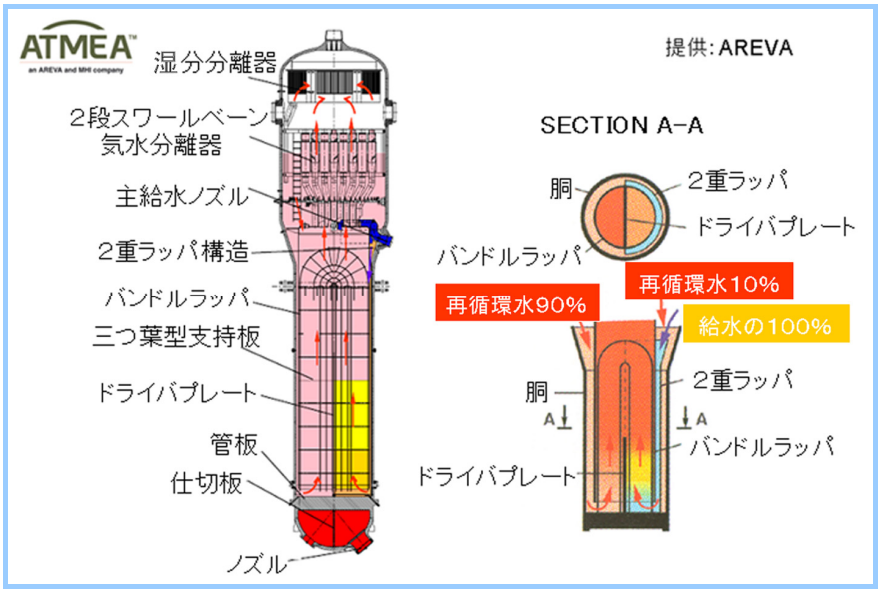


図1 エコノマイザ付き蒸気発生器
エコノマイザによる蒸気発生器の構造及び器内の温度分布を示す.

(4) 非常用電源設備

非常用電源は, 多くの実績を持つディーゼル発電機を標準設計としている. また併せて保守費低減・建屋体積縮小メリットがあり, 三菱重工の海外向け最新プラントで採用予定のガスタービン発電機の適用も代替案として検討している.

(5) 中央制御室のディジタル式計測制御設備

実績のある総合ディジタル技術を用いて, マン・マシン・インターフェイスの向上, 自動化, 高性能信号処理によるヒューマンエラー発生確率の低減を図っている. また, 事故後モニタリングシステム機能を備えた安全系のバックアップパネル採用により, 安全性・信頼性の向上を図った設計を採用している.

3.2 高い運転性能

ATMEA1™ は, 高い熱効率及び高い稼働率を達成することにより, 経済的な原子力発電所の運転を可能としている. また, 高度な日負荷追従性能, 周波数制御能力を有すると共に, 長期サイクル運転対応, MOX 燃料(ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料;Mixed Oxide Fuel)の装荷等, 顧客のニーズに合わせた柔軟な対応を実現できる設計としている.

(1) 高い熱効率

標準設計として, 熱出力 3150MW において, 電気出力 1150MWe(送電端), 熱効率37%(送電端)を達成できる設計としている. これは1次系の運転温度と冷却水流量を最適化し, エコノマイザ付き高効率蒸気発生器を採用して蒸気圧力を 7.3MPa まで増加させる設計, 並びに最高効率タービンの性能により実現するものである. 同じ熱出力に対して従来の原子力発電プラントと比較して電気出力を約10%増加させることが可能となる.

(2) 高い稼働率

ATMEA1™ は, 60年の設計プラント寿命を通して95%以上の稼働率を実現できる設計としている. 設計対応として, ①補機冷却系及び非常用電源系などサポート系の多重化による運転中保守を可能とする設計, ②運転中に格納容器内(限定区域)への立ち入りを可能とする設計, ③必要十分な保守スペースの確保, を採用することで, 通常の燃料取替えを伴う定期検査を16日以下で計画している.

① サポート系の多重化による運転中保守の実施

補機冷却系及び非常用電源系は3系列の構成としているが, 定期検査の工程上クリティカルとなることより, 保守時切り替え用のバックアップ系列(ディビジョンX)を設置する構成とし

て，運転中保守を行える設計とした．各系列内の負荷をディビジョンXに切り換えることで，プラント運転中の予防保全，補修を容易に実施することが可能である．

② 運転中の格納容器内立ち入り

格納容器内を2区画に区分し，操作床面及び2次遮蔽壁外側の周辺区画へは，運転期間中においても立入ができる設計とすることで，定期検査のためのプラント停止前後の格納容器内作業を可能としている．この対応により定期検査の期間を短縮することができる．図2に運転中の格納容器内立ち入り可能範囲を示す．

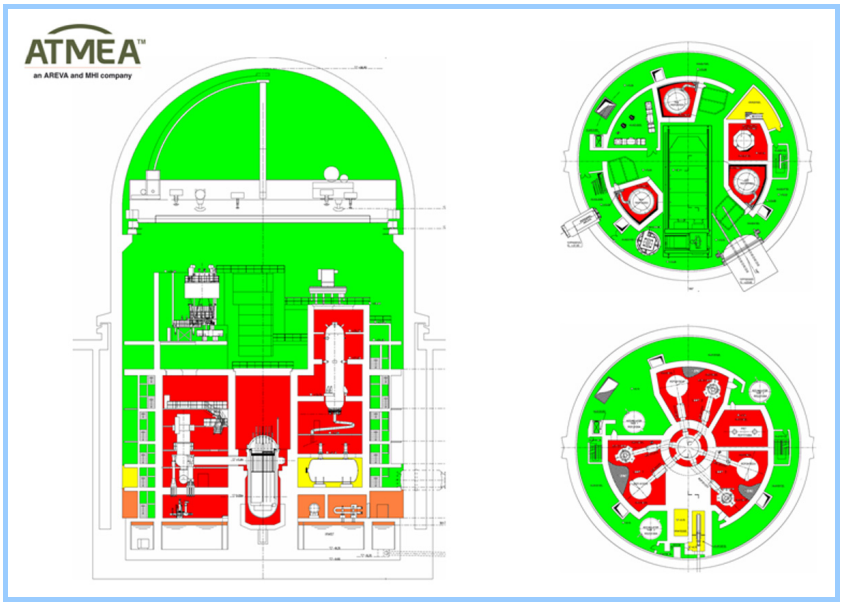


図2 運転中の格納容器内立ち入り可能範囲
緑色の部分（操作床面及び2次遮蔽壁外側）には運転期間中に立ち入りが可能である．

(3) 運転の柔軟性，サイトへの適合性

ATMEA1™ は，以下に示す顧客のニーズに合わせた柔軟な運転性，及び幅広いサイトへの適合性を持つ．

- 運転サイクルを 12 ケ月から 24 ヶ月までで間に設定が可能
- 高度な負荷追従運転と周波数制御能力を保有
- 100%（フル MOX）までの MOX 燃料の装荷に対応可能
- 周波数50Hz，60Hz いずれにも対応
- プラント設計を大きく変えることなく，様々なヒートシンク条件に対応
- 標準の耐震設計条件は，0.3g-SSE（U.S.NRC Regulatory Guide に基づく），高震度サイトへの設計対応も考慮
- 岩盤の条件は硬質／中間／軟質に対応（EUR: European Utilities Requirement へ適合）

3.3 Generation Ⅲ+プラントとしての最高レベルの安全性

ATMEA1™ では，多重性の考慮，及び明確な分離設計の実施により，システムの安全性・信頼性を向上させ，従来型 PWR に比べて炉心損傷確率及び大規模放出確率を1桁低減している．更に，シビアアクシデント（炉心溶融事故）後の格納容器長期健全性及び大型商用航空機衝突への耐性に対しては，欧米を中心に将来プラントに要求される最新の規制動向を満たす設計対応を行っている．また，総合ディジタル化技術を用いて，ヒューマンエラーの発生確率の低減を図ると共に，事故時の事象収束に対処するための運転操作開始までの充分な時間余裕を確保している．

これらにより，世界でもトップレベルの安全性を有し，かつ周辺住民への安心感を高めたプラントを実現している．以下に主な特徴を説明する．

(1) 3系列構成の安全系

ATMEA1™ では，独立した3系列構成の非常用炉心冷却設備を備えており，1系列で安全停止，余熱除去に対応が可能な設計としている．この設備は事故収拾能力の高いアクティブ系主体の構成であり，一部に，高性能蓄圧タンク，格納容器内燃料取替用水ピット等のパッシブ系設備を採用することで，システム構成を簡素化するとともに信頼性の向上を図っている．また，系列間，安全系・常用系間では明確な分離設計がなされている．

これらによって，信頼性及び経済性の最適化を達成している．図3に非常用炉心冷却設備の系統構成図を示す．

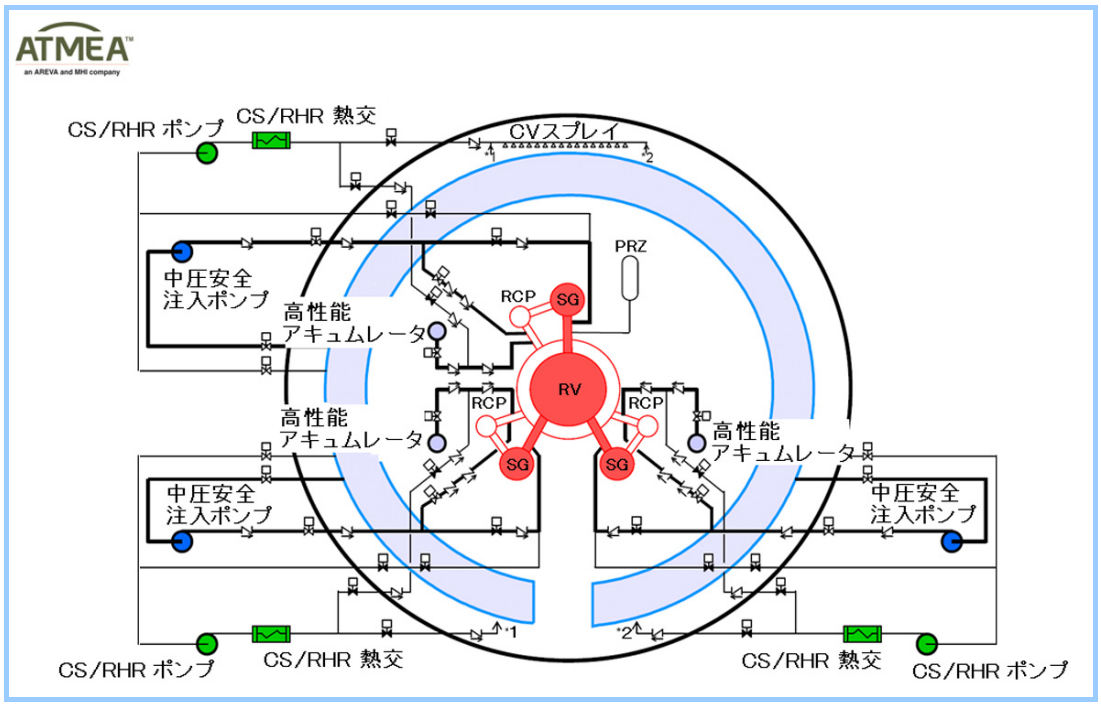


図3 3系列安全系系統構成
独立した安全系の系列を示す．

(2) 高性能蓄圧タンク

ATMEA1™ では，最新の三菱重工プラントと同様に，高性能蓄圧タンクを採用している．渦巻きダンパが蓄圧タンクからの注入流量を静的に切り替えることにより，低圧注入ポンプの役割を蓄圧タンクに統合することが可能となり，低圧注入ポンプの削減によるシステムの簡素化を達成した．加えて，蓄圧タンクからの注入時間を従来よりも長くできることで，安全注入ポンプの起動時間要求を緩和できるため，非常用電源に対する設計要求を大きく緩和できるメリットがある．

(3) コアキャッチャ

シビアアクシデント発生時に，長期にわたり溶融炉心を安定に保持，冷却する目的で，耐熱床構造及び冷却水供給系より構成されたコアキャッチャを採用し，シビアアクシデント時にも格納容器健全性が長期間にわたり確保できる設計としている．これは AREVA 社最新プラントに採用され欧州規制にも適合した概念である．図4にコアキャッチャの概念図を示す．

(4) 航空機衝突防護

高強度コンクリート製で壁厚を増加したプレ・ストレスト・コンクリート製格納容器（PCCV)を採用することで，大型商用航空機衝突に対して格納容器内に設置された設備を防護する設計としている．また，周辺建屋に設置される安全機能を保証するために必要な設備は，このような建屋壁厚増加，あるいは距離による分離配置によって航空機衝突から防護する設計としている．図5に航空機衝突防護の概念図を示す．

4. ATMEA1™の配置設計

ATMEA1™ の配置設計は，国内の高震度地域・狭隘サイト対応で実績のある三菱重工の設計をベースに実施されている．耐震性を考慮し，安全系関連設備を配置する建屋（格納容器，燃料取扱建屋，安全系建屋）は一体のベースマット上に設置することが容易な矩形建屋を採用している．

各安全系の系列は，完全に分離された区画に別々に配置し，各区画は他の区画から物理的に壁・床等で分離されることで，火災などの内部事象が1つの区間から他の区間へ波及しないように設計されている．図6に区画分離の説明図を示す．

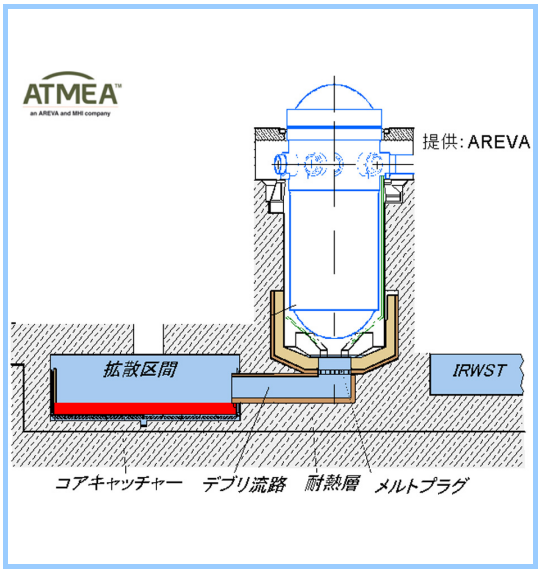


図4　コアキャッチャ概念図
コアキャッチャの構造概念を示す．

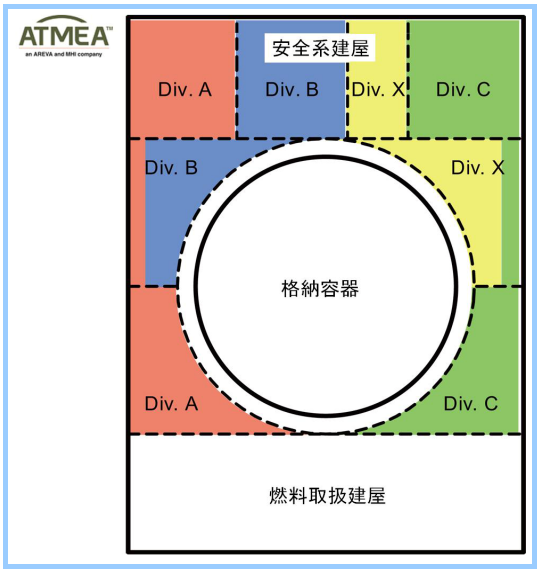


図6　区画分離説明図
安全系の各区画の配置を示す．

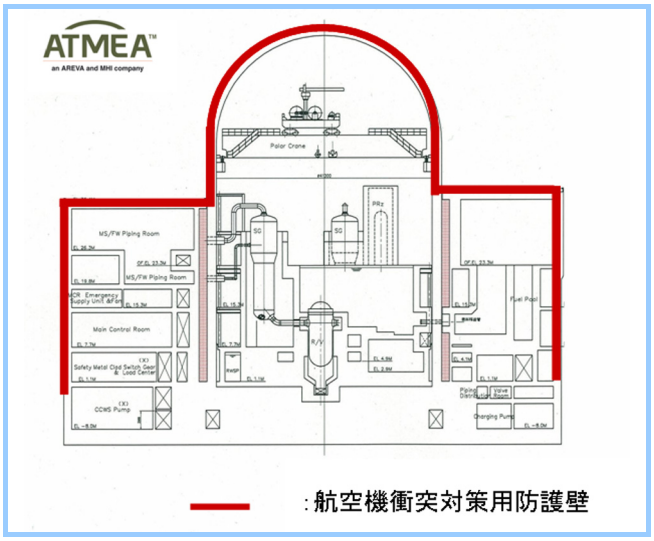


図5　航空機衝突防護概念図
航空機衝突防護のために壁厚を増加させた範囲を示す．

5. まとめ

ATMEA1™ は，検証された技術に裏打ちされた確かな信頼性，高い熱効率・高い稼働率，そして最高レベルの安全性を有する，電気出力 1100MWe 級の3ループ，GenerationⅢ+プラントである．また，顧客のニーズに合わせた柔軟な運転性及び幅広いサイトへの適合性を持ち，許認可取得も容易である．

世界有数の総合原子力プラントメーカである三菱重工と仏 AREVA 社による合弁会社 ATMEA™ が精力的に推進しており，本年度に基本設計完了の予定である．当社は，世界各国で採用頂けるよう，設計認証，詳細設計，並びに受注活動を強力にサポートしていく．