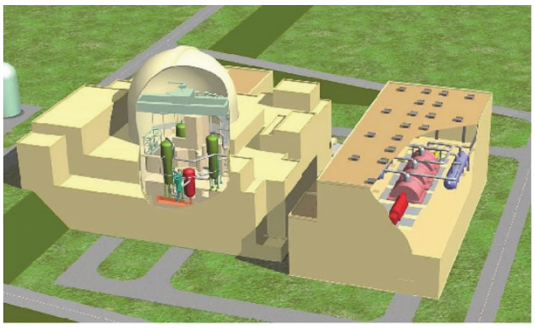
革新的な次世代 PWR の開発

Development of Innovative Next-Generation PWR



西谷 順一*1 Junichi Nishitani
西尾 浩紀*2 Hiroki Nishio
畔川 和樹*3 Kazuki Azekawa
秋元 成之*4 Sigeyuki Akimoto
水田 秀彦*5 Hidehiko Mizuta
中原 隆*6 Takashi Nakahara

三菱重工業(株)(以下，当社)では，将来を見据えた新しい PWR(加圧水型軽水炉：Pressurized Water Reactor)の開発を行っている。この三菱次世代 PWR は，福島第一原子力発電所事故(以下，福一事故)を受けて安全性，信頼性を従来より飛躍的に向上させ，かつ，再生可能エネルギーの拡大など，将来の国内エネルギー情勢に適切に対応することのできる，革新的な電気出力 120 万 kW 級の中型原子力発電所であり，そのコンセプト及びプラント仕様をまとめた。

1. はじめに

原子力発電は，大規模・安定的に電力を供給可能なカーボンフリー電源として，脱炭素化目標の達成や我が国のエネルギーセキュリティ(自給率)の観点から重要なエネルギー源と位置付けられており，新規の原子力発電所の建設ニーズは，エネルギー政策で掲げる 2030 年代の原子力比率 20～22%の達成に向けて，今後高まってくるものと予想される。

当社は，国内において関西電力(株)美浜1号機(1970 年運転開始)以来北海道電力(株)泊3号機(2009 年運転開始)まで 24 基に及ぶ PWR プラントの建設を担い，福一事故以降は，安全性向上対策工事や特定重大事故等対処施設の設置工事などに継続的に携わってきており，PWR プラントの建設に対しては世界でも有数の経験，知見を有している。

これらの経験，知見を活かし，当社では，将来の社会のニーズに応えるべく，三菱次世代 PWR の開発を行っているところである。

2. 三菱次世代 PWR のコンセプト

原子力発電所の建設は，計画から運転開始まで 10 年以上を要する非常に長期のプロジェクトであり，発電所の運転が開始される将来の社会ニーズを適切に取り入れた設計とする必要がある。このため，将来の社会情勢，エネルギー情勢を分析し，三菱次世代 PWR として具備すべき要件を整理した。

2.1 安全性，信頼性

従来より，原子力プラントでは高い安全性が求められてきたが，福一事故以降，更に高い安全性，信頼性を確保するとともに，安心感が得られるプラントでなければ，社会に受け入れられない状況にある。

三菱次世代 PWR では，より安全性，信頼性が高く，安心の得られるよう，以下のコンセプトで開発を行っている。

*1 原子力セグメント 原子力技術部 グループ長
*2 原子力セグメント 原子力技術部 主席技師
*3 原子力セグメント 原子力技術部
*4 原子力セグメント 原子力技術部 次長
*5 原子力セグメント 原子力技術部 主幹
*6 原子力セグメント 原子力技術部 部長

(1)　外部事象への対応(耐震性，津波耐性)

福一事故の教訓を踏まえ，地震，津波などの自然現象に対して十分な裕度をもって耐えうるプラントであることは三菱次世代 PWR が満たすべき必須の条件である。これまでの知見を反映したサイト条件を設定し，自然現象に対して十分な耐力をもったプラントの開発を行っている。

(2)　内部事象への対応(安全思想)

三菱次世代 PWR においては，内部事象に対して以下のような安全性向上のコンセプトを掲げて開発を行っている。

- 炉心損傷に至る事故に対応する安全系設備の多重性を強化し，更にそれぞれの構成機器に対しては，動的機器と静的機器のそれぞれのメリットを適切に組み合わせ，信頼性を確保しつつ，早期の事故収束を可能とする。
- 上記の安全性向上策を講じて，炉心損傷の発生確率を，震災後に安全対策を強化した従来プラントの 1/10 レベルとする。
- 万が一の炉心損傷を想定した場合でも，安全に対処できるように独立した設備を設置する。更に福一事故のように溶融炉心が格納容器内に放出されたとしても，周辺住民の避難が不要となる線量レベルに維持可能なようにする。

(3) セキュリティ(意図的外部事象への対応)

近年の社会情勢を踏まえると，作為的な妨害行為に対する対策も安全上の重要なポイントである。三菱次世代 PWR としては，意図的な航空機衝突や電子的侵入等のサイバー攻撃に対しても防護できるように開発を行う。

2.2 柔軟な運用性

地球温暖化対策として，京都議定書発効以降，CO_2 排出量削減に向けた国際公約が公表されており，今後ますます CO_2 の排出規制は厳しくなっていくものと予想される。現状においても，国内の電源構成における脱炭素電源の割合は，主に再生可能エネルギーの分野において顕著に増加しており，この傾向は三菱次世代 PWR が建設される段階においても大きく変化することはないものと考えられる。

これまで原子力とともに大容量の基幹電源として運用されてきた火力発電プラントは，石炭火力を初めとして徐々に運用を制限されつつある。再生可能エネルギーの主力である太陽光，風力発電プラントは特性上安定性に劣り，火力発電プラントに代わる役割を十分に担うことが難しく，脱炭素かつ安定した大容量電源である原子力発電は今後の国内の基幹電源としてその代替としての役割を担うことが期待される。

一方で拡大基調の再生可能エネルギーとの共存が求められることから，三菱次世代 PWR においては電力系統からの要請に従い速やかに電気出力を変動させる能力(負荷追従能力)や，電力系統の不安定性に対する耐力を向上させ，柔軟な運用を可能とすることを開発コンセプトとしている。

2.3 競争力の高い発電コスト

原子力発電を今後の基幹電源として位置付ける場合，求められるのは高い発電品質(安定性，信頼性)と経済性(発電コスト)となる。

現在国内で稼働している原子力発電所では，福一事故以降，強化された国の安全基準への適合のため，多くの安全対策を施すことにより安全性の大幅な向上を図っている。三菱次世代 PWR では，開発の段階からこれら安全対策設備を含めた設計が可能であり，後から追加することに比べ大幅に合理的に対応することができる。

これらを含め，開発段階より経済性の向上を目標とした取組みを行っており，より安価な発電コストの達成を目標としている。

2.4 運転・保守性

当社は，これまでに国内 24 基の PWR プラントを建設し，これらすべてのプラントの保守，保全

に携わってきた実績を持つ。三菱次世代 PWR の開発に当たっては，これらの実績における保守，保全の経験を活かし，より運転しやすく，保全の効率の良い設計を採用する。運転のしやすさは運転操作の信頼性に，保全のしやすさは運用コストの削減につながることとなるため，これらを設計段階から取入れ，運転・保守性に優れたプラントとすることを開発のコンセプトとしている。

3. 三菱次世代 PWR のプラント仕様

前項の開発コンセプトに基づき，当社では次世代 PWR のプラント仕様の検討を行っているところである。本項では，次世代 PWR の主要な仕様につき，概説する。

3.1 プラントの基本仕様

(1) プラントの電気出力

国内の原子力発電プラントは，スケールメリットによる経済性の追求の観点で順次出力が大型化する傾向となっており，最新の改良型 PWR においては 160 万 kW 級の電気出力を得られるものとして計画されている。一方で，停止時に大きな代替電源を必要とすること，及び拡大基調にある再生可能エネルギーを含む他電源と共存しやすいことという観点においては，そこまでの大型大容量とする必要性は低くなるものと考え，三菱次世代 PWR の電気出力は中型の 120 万 kW 級として計画することとした。

(2) 安全設備

三菱次世代 PWR の安全設備は，福一事故を反映して安全を確保するために十分な能力を有するよう設計している。

自然現象への耐性として，地震に対しては従来の PWR プラントの2倍の耐震性を確保することを目標として設定している。また，津波に対しては敷地高さを基準津波高さ以上とすることを前提とし，建屋の水密化及び設備配置を適正化する対策を採用する。

いわゆる設計基準事象への対応としては，従来は事故の発生防止及び影響緩和設備に対して2系列(トレン)の設備を設置し，1系列の故障(単一故障)が発生した場合においても機能を維持できるようにしていたものを，三菱次世代 PWR では3系列(トレン)に増強し，多重性の強化を図った。

また，設計基準事象への対応設備と，設計基準を超えるシビアアクシデントへの対応設備を独立して設置し，安全性を強化した。

さらに，福一事故のように炉心の溶融が生じた場合においても，溶融炉心の冷却，閉じ込めが確実に実施できるよう，専用の設備を設置する計画としている。

最後に，上記の設備がすべて機能しなかった場合においても，発電所周辺への放射性物質の放出を抑制するシステムを導入し，周辺の居住者の避難が不要となる線量レベルに維持できるようにしている。

三菱次世代 PWR の安全設備について，表1及び図1に示す。

表1 三菱次世代 PWR の安全設備の特徴

安全対策設備	三菱次世代 PWR での対応	
設計基準事故対応設備	対応設備の3系列(トレン)設置	多重性の強化による安全性向上
重大事故対処設備 (シビアアクシデント)	設計基準事故対応設備と独立で設置 恒設設備化	重大事故に対しても恒設設備を設計基準事故対応設備とは独立に設けることによる安全性向上
溶融炉心対策設備	溶融炉心冷却システム	万一の炉心溶融が発生した場合でも確実に閉じ込め，冷却を行う
放射性物質放出防止設備	放射性物質放出抑制システム	周辺環境への放射性物質放出の抑制，環境の線量を避難不要レベルに維持

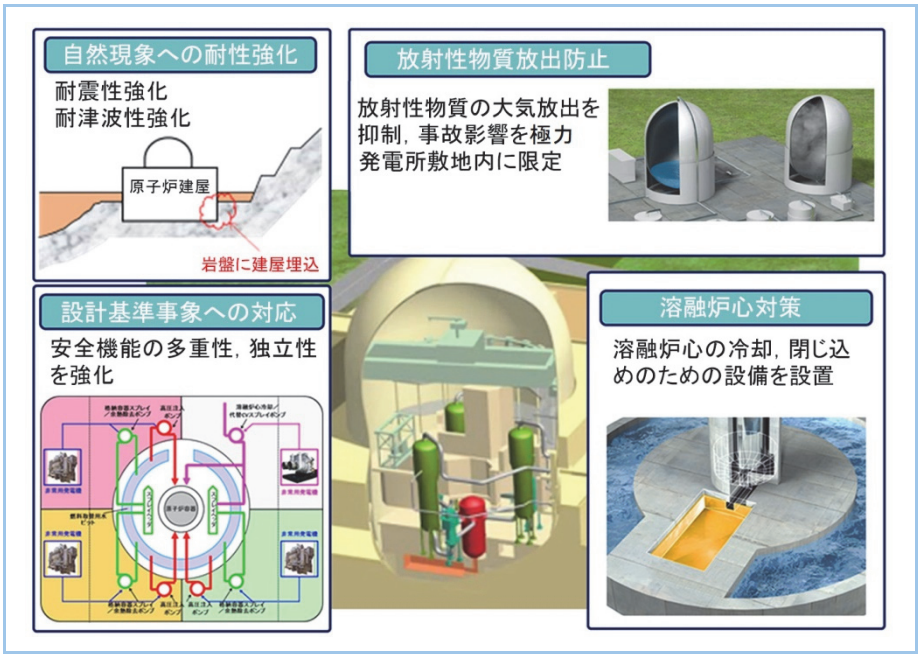


図1　三菱次世代 PWR の安全設備の例
福島第一原子力発電所事故を踏まえ，十分な安全性を確保

(3) タービン設備

タービン設備は，最新の高効率蒸気タービンを採用する。低圧タービン最終翼列を世界最大級の74インチとし，高効率化及び設備全体のコンパクト化を図る(図2)。

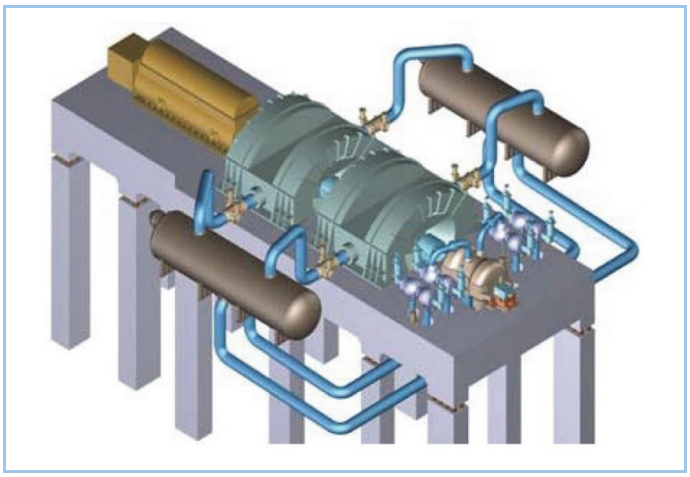


図2　三菱次世代 PWR のタービン設備
74 インチの大型最終翼を採用し，全体をコンパクト化

(4) セキュリティ対策

従来よりもセキュリティ対策を強化するとのコンセプトに基づき，三菱次世代 PWR においては物理的なセキュリティの強化策として，特に意図的な航空機衝突に対する耐性を高める。発電所に対する航空機衝突に対して安全機能が十分に維持されるよう，建屋設計の段階から考慮を図るとともに，特定重大事故への対処設備を適切に設置し，従来よりもセキュリティ対策を飛躍的に強化することとしている(図3)。

また，今後脅威が増大することが予想されるサイバーテロへの対策も，外部からの電子的侵入防止や内部脅威への対策を強化するなど，プラントの安全に影響が及ばないように適切な設計を行う。特にデジタル技術などは今後も大きく発展していくことが予想される分野であり，プラントの運転時点で適切な対処が行え，将来的な技術革新に対しても柔軟な設計対応ができるようにあらかじめ考慮している(図4)。

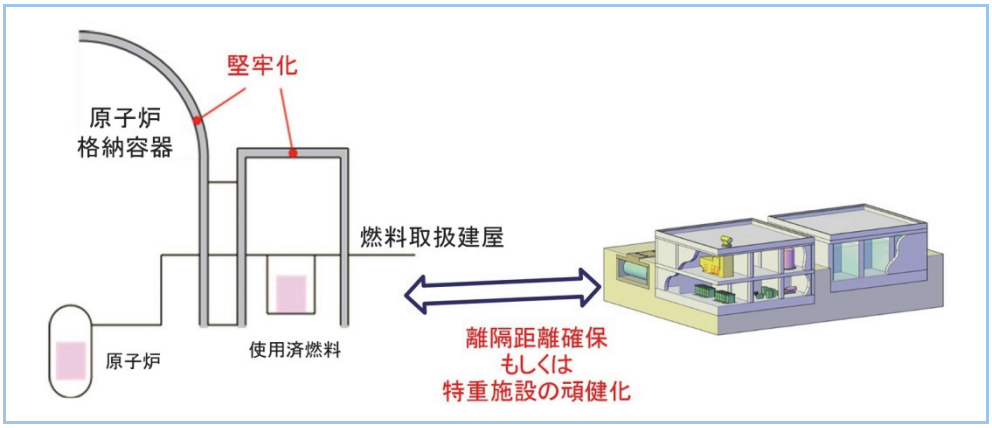


図3 セキュリティ対策(航空機衝突)
建屋防護の強化と特定重大事故等対処設備の適切な設置

図4 セキュリティ対策(サイバーセキュリティ)
外部からの侵入防止及び内部脅威への対応

(5) プラントの運転性能

将来の社会的ニーズを踏まえた柔軟なプラント運用を可能とするコンセプトに基づき，三菱次世代 PWR では運転性能を強化する。日間の電力負荷変動に対応するための日間負荷追従能力を向上させ，従来よりも大きな負荷変化幅及び負荷変化率に対応できるようにするとともに，短時間での負荷変動に追従できるようにするため，周波数制御能力を高める。また，再生可能エネルギーの不安定性などに起因して電力系統の擾乱が生じた際に，原子炉の停止に至らないよう，所内単独運転性能を向上させる(図5)。

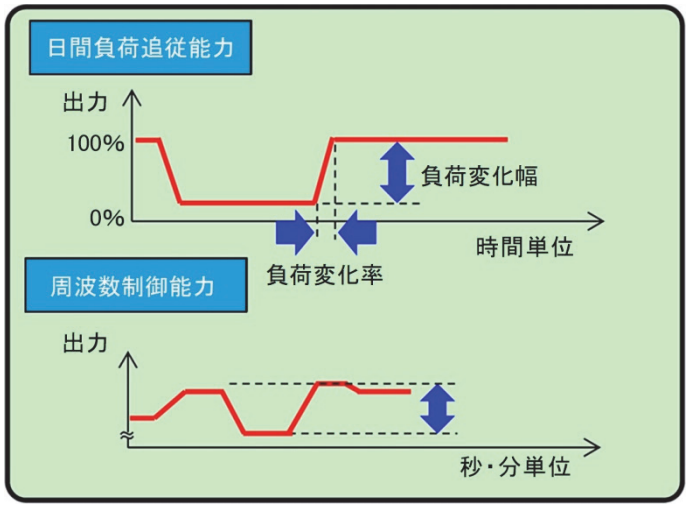


図5 プラントの運転性能
日間負荷追従能力と周波数制御能力

(6) 保守性

保守性の向上は，発電コストの観点だけでなく安全性の観点からも重要なファクターである。このため，三菱次世代 PWR においては，3D-CAD を用いた保守作業シミュレーションなどを通じ保守性の向上を設計段階から考慮する。さらに，最新のデジタル技術を用いて運転員の負担を軽減し，運用性を向上させる。

3.2 建設工期

当社が手掛けたこれまでの国内 PWR プラントは，着工（岩盤検査合格）から4年程度で原子炉の臨界を迎えている。発電所の建設工期を如何に短縮させるか，ということは電力会社にとって重要な課題になる。

一方で，今後建設される原子力プラントにおいては安全性向上のための安全設備を増強するため，建設工期は従来よりも長期化することが予想され，三菱次世代 PWR においては開発の段階より建設工期の短縮に向けた取組みを行うことで，立地条件等による不確定な要素は除き従来より1年程度の工期延長に留めることを目標に取り組んでいる。

3.3 建設コスト

プラントのコンセプトとしている発電コストの低減に対し，建設コストの抑制は大きく寄与する。建設コストは，プラントの設備仕様に依存するため，三菱次世代 PWR では設計の段階より建設コストを抑制するため，より合理的な設備仕様となるよう，開発を行っている。これにより，より安価な発電コストの実現を目指す。

4. 設計プロセスの改善

当社では，上述の通り三菱次世代 PWR の仕様の検討を進めるとともに，時代に即したより合理的でスピーディーな先進的設計プロセスの導入を推進している。以下にその一例を示す。

4.1 適切な構成管理（CM：Configuration Management）

2020 年4月に施行された新検査制度（原子炉等規制法の改正）において，従来，原子力規制委員会（NRA：Nuclear Regulation Authority）が実施していた検査はすべて電力会社が実施し，NRA は原子力規制検査により，その結果及び妥当性を評価する仕組みとなった。また，電力会社の設計・工事段階から保全活動にわたるすべてが監視・評価対象となり，NRA 検査官は，立入り，書類，質問等によるフリーアクセスが可能となった。この新検査制度は，三菱次世代 PWR にも適用されることから，NRA 検査官のフリーアクセスに的確かつ迅速に対応するために，これまで以上に適切な CM の実現が求められている。これを踏まえ，CM 適正化の取組みとして，設計要求事項の明確化，上下流インターフェース（I/F）の整流化等を行い，図書体系の見直しを図るとともに，図書間の上下流関係及び整合性を維持管理する仕組みを導入する（図6）。また，CM 適正化の取組みと合わせて，WBS（Work Breakdown Structure）適用による図書番号，機器番号体系の見直しを検討しており，統一的なコード体系の適用により，プロジェクト全体のコスト・工程進捗管理の高度化に加え，情報の集約・検索性の向上にも寄与する活動として取り組んでいる。

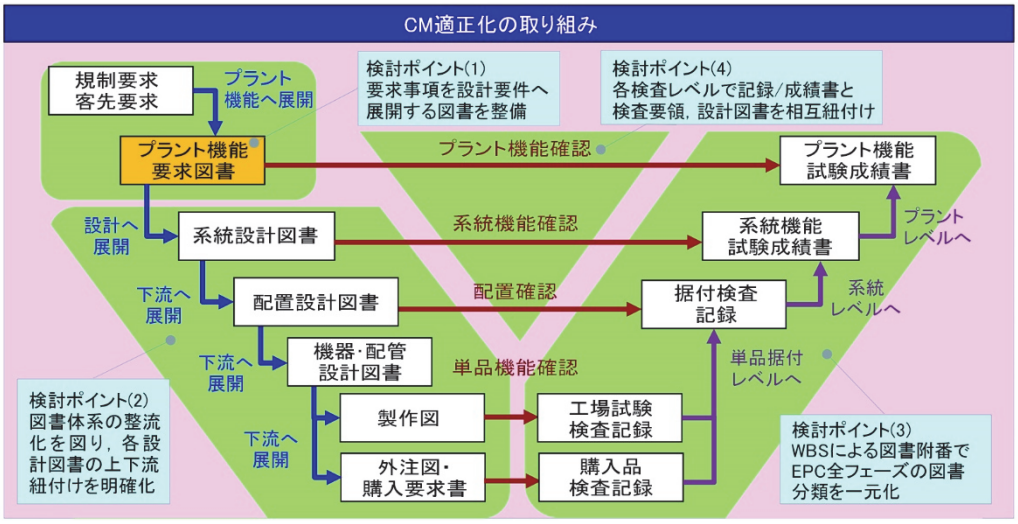


図6 CM 適正化の仕組み
三菱次世代 PWR の開発における CM 適正化に向けた取組みを進めている。

4.2 3D-CAD データ活用高度化

原子力では 1990 年代より 3D-CAD を中心としたデジタル技術の適用を進めており，2009 年に運転開始した泊3号機では配置設計，客先承認，製作情報（溶接，検査等）のデジタル I/F，工事現場での工事計画表示に 3D-CAD を適用している。三菱次世代 PWR においては，3D-CAD による設計の早期確立に加え，3D-CAD データベースを工事計画，製作・調達，現地工事，ゼネコンとの I/F，PJ 全体コスト・工程進捗管理に至るまで全域活用することで，更なる品質向上，業務効率化，工程遅延防止を図る方針である。現在，3D-CAD データに加え，系統図（2D）データ，各種機器仕様データ等のプラントデータを連係／統合するデータベースの構築を検討しており，上流から下流へのシームレスな情報伝達/共有が可能な仕組みを目指して取り組んでいる（図7）。

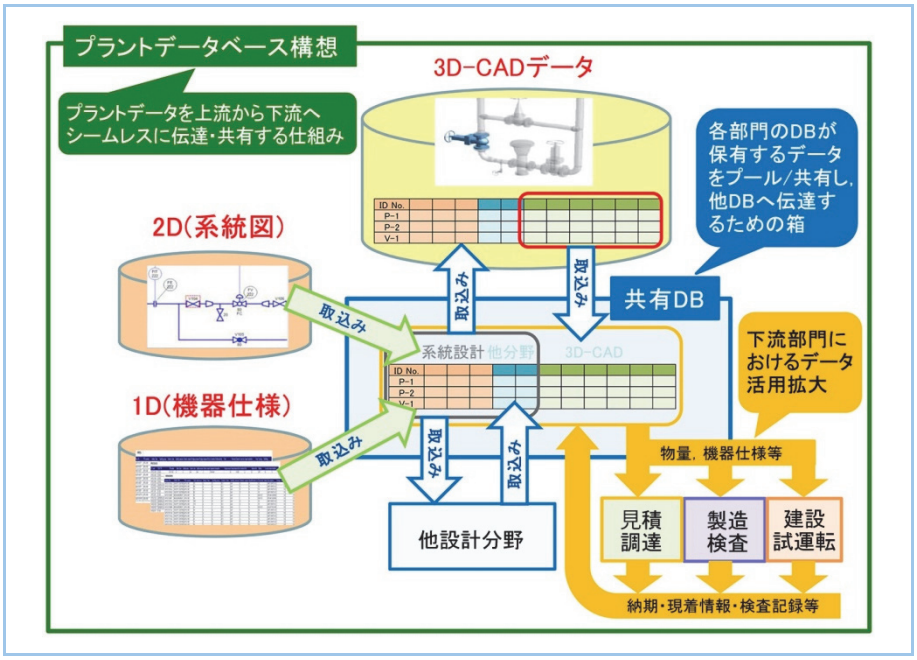


図7 3D-CAD データ活用
上流設計からプラント建設までシームレスな情報伝達/共有の仕組みを構築している。

5. まとめ

当社では，安全性，信頼性を向上させ，再生可能エネルギーとの共存が可能な次世代の PWR の開発を行い，プラントのコンセプト及び基本仕様を確立した。

将来の社会ニーズに適切に応える合理性の高いプラントとすることを目指し，プラントの仕様だけではなく，設計のプロセスにも踏み込んだ取組みを行っている。

今後，更に詳細なプラント仕様の検討を行い，お客様のみならず，社会に受け入れられる原子力プラントとすべく，開発を継続していく予定である。