

BWRの現状と今後の展開

Current Status and Development of Boiling Water Reactors

現在、わが国で運転中の軽水炉発電プラントは合計38基に達し、安定した電力供給源として大きく貢献をしている。今後、世界的なエネルギー需要の増大や地球環境問題などを考慮すれば、原子力発電が長期にわたって電力供給の重要な役割を担うことが期待される。これにこたえるため、より信頼性、経済性の高い軽水炉の実現、および次世代炉の概念構築を官民一体となって進めている。一方、運転プラントの増加に対応して、プラント総合サービスを強化し、予防保全など信頼性向上を最重点に運転・保守支援活動を推進している。

水野雄弘* *Katsuhiko Mizuno*

林 勉** *Tsutomu Hayashi*

横見迪郎*** *Michirō Yokomi*

1 緒 言

わが国の原子力発電は、全発電電力量の25%以上を担うまでになり、安定した電力供給源として大きな貢献をしている。これはひとえに、国および民間が一体となって軽水炉の信頼性向上、放射線量低減、稼働率の向上などに改良技術を適用してきた成果といえることができる。

通商産業省総合エネルギー調査会が、平成2年6月に発表した長期エネルギー需給見通し¹⁾によれば、わが国の原子力発電設備容量は現在の約3,000万kWから西暦2000年には5,050万kW、2010年には7,250万kWが必要になるとされている。これは、省エネルギー対策を抜本的に強化したケースの値であり、地球環境問題などを考慮すれば、原子力発電が今後長期にわたって電力供給の重要な役割を担うことが期待される。これにこたえるため、いっそうの安全性・信頼性の向上とともに、経済性の向上を目指した高度化への努力が続けられている。

日立製作所は、BWR(沸騰水型原子炉)プラントの総合メーカーとして技術改良を積極的に推進し、合計12基のプラント建設を担当してきたが、最近では平成元年2月に中国電力株式会社島根原子力発電所2号機(以下、島根2号機と言う。)を、また平成2年4月には東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所5号機(以下、柏崎刈羽5号機と言う。)を完成させ、さらに現在3基のプラントを建設中である。また、BWR技術の集大成として国際協力で開発したABWR(改良型BWR)の初号機である柏崎刈羽6,7号機の建設推進に力を注いでいる。

一方、運転プラントの増加に対応して、運転・保守性向上の要求にこたえるため、プラント総合サービスを強化し、予防保全など信頼性の向上を最重点に運転・保守支援活動を行っている。

以下、日立製作所の活動を中心に、BWR技術の現状と今後の展開について概要を述べる。

2 BWRの建設・運転状況

2.1 建設状況

日立製作所は、図1に示すように米国GE(General Electric)社、株式会社東芝との共同建設を含め国内BWR12基の建設に携わってきた。平成2年4月営業運転が開始された柏崎刈羽5号機は、軽水炉第2次改良標準化の成果を全面的に採用するとともに、日立製作所の最新技術を適用した電気出力1,100 MWのプラントであり、信頼性、運転性のいっそうの向上を図っている。また、建設では国内で初めて世界最大級の大型移動式クレーンを導入し、大型ブロックによるプレハブ工法などを採用して、現地作業の効率化と信頼性の向上を達成した。

現在は北陸電力株式会社志賀原子力発電所1号機、中部電力株式会社浜岡原子力発電所4号機および柏崎刈羽4号機の建設を順調に進めている。建設準備中の柏崎刈羽6,7号機(ABWR)についても、着工に向けての取り組みを鋭意進めている。

2.2 運転状況

BWRの運転状況として、設備利用率をみると近年はほぼ70%の高レベルを維持している。これには、(1)炉心・燃料および運転法の改良による負荷率の向上、(2)作業効率化による定期検査期間の短縮、(3)システム・機器の信頼性向上などが寄与している。

また、作業従事者の受ける放射線量については、線量の源

* 日立製作所 原子力事業部 ** 日立製作所 日立工場 *** 日立製作所 日立工場 工学博士

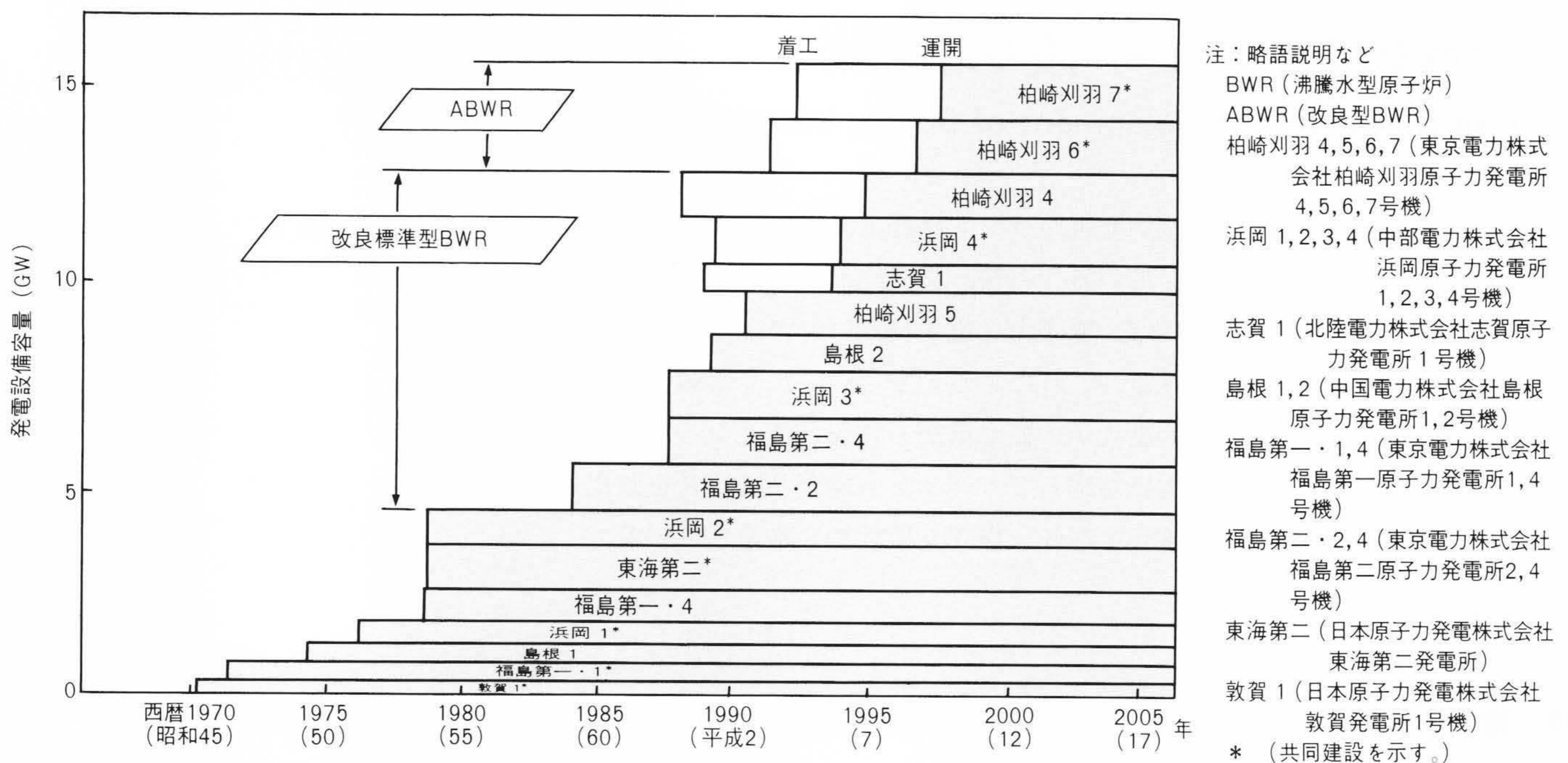


図1 日立BWRの建設実績と計画 日立製作所は、共同建設を含め国内BWR12基の建設に携ってきた。さらに、建設中3基、建設準備中3基を担当している。

となる作業環境の雰囲気線量率自体を低下させることを最優先し、さらに定期検査作業の合理化および遠隔自動化技術などを適用し低減してきた。最新の放射線量低減技術を適用した島根2号機の第1回定期検査時の一般定期検査作業員の受けた線量当量は、0.15人・Sv以下という低い値を記録しており、BWRでの放射線量低減技術は定着してきたと言える。

2.3 信頼性向上活動

日立製作所は、原子力発電所の安定な運転を維持するため、安全性および運転信頼性の確保と向上にいつそうの努力を傾注している。

信頼性は、設計の段階から製作、建設の工程を経て作り込まれ、検査、試験でひとつひとつ検証されるものであるという認識に立ち、図2に示すように、すべての段階にわたって信頼性向上のため総合的な活動を展開している。

また、運転に入ってからこの信頼性が長期間にわたり維持されるように、総合予防保全活動などを通して電力会社への支援を強化している。

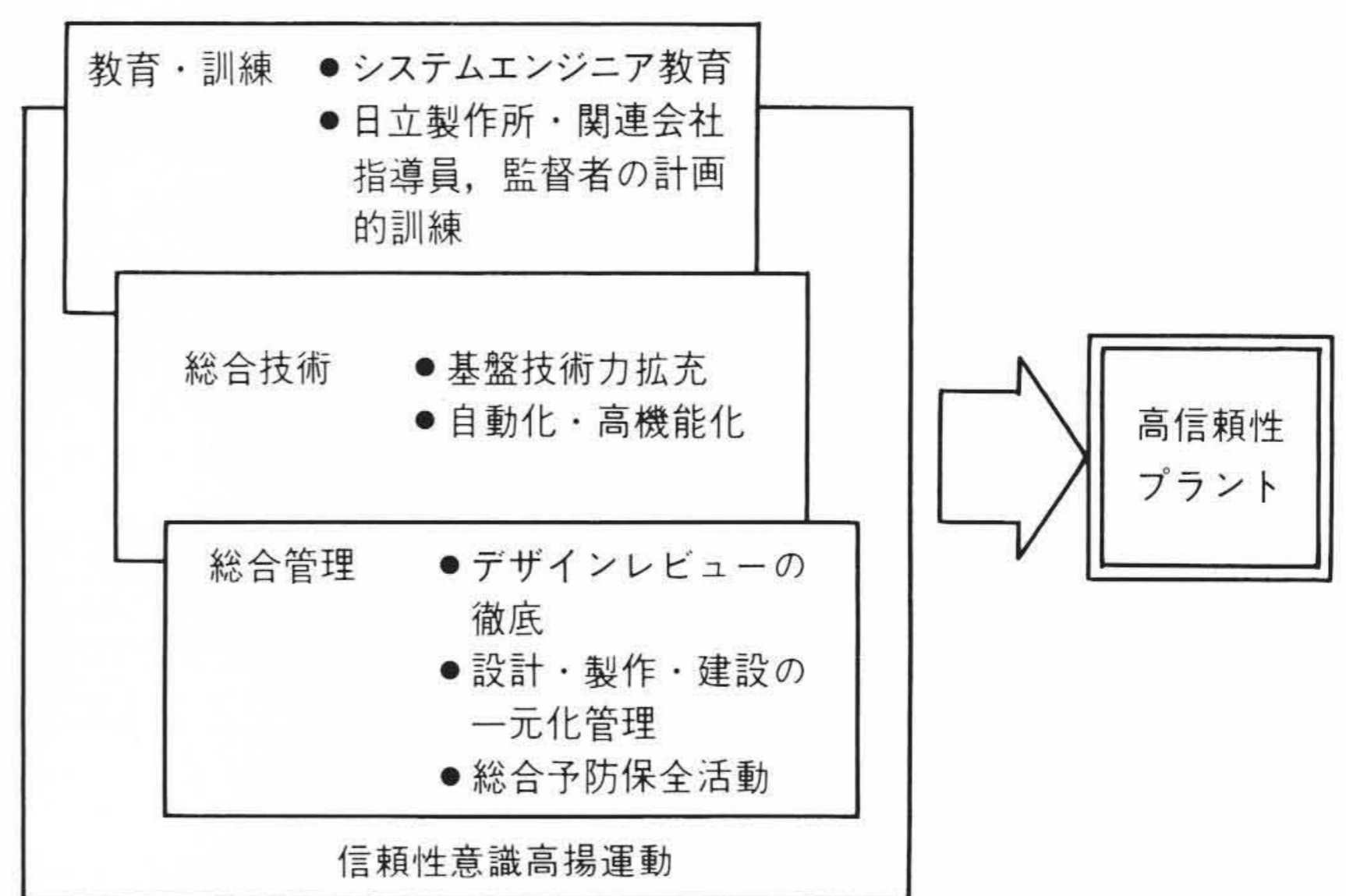


図2 原子力総合信頼性向上活動 教育、技術、管理の各分野での重点施策を総合的に実行して、信頼される原子力プラントの建設・保守に努めている。

を得て改良標準化および各種の信頼性実証試験を推進してきた。近年はその成果も十分生かされ良好な運転実績が得られている。

今回、わが国の軽水炉に新時代を画するABWR初号機(柏崎刈羽6, 7号機)の建設を進めることになり、日立製作所の総合技術力を結集してこれに取り組んでいる。

さらに、ABWRに続く日本型軽水炉として、21世紀初頭に導入が期待されている次世代炉については、軽水炉高度化の動向に合わせ、研究開発を進めている。

以下、各技術分野ごとに技術開発の現状と展開について述べる。

3.2 技術開発の現状と展開

3.2.1 炉心燃料

日立製作所は、原子力開発に着手した当初から炉心燃料技術は中枢技術であると考え、**図3**に示すように特に重点を置いて開発に努めてきた。例えば、炉心燃料改良による燃料漏えい低減、信頼性向上に引き続き、日立改良炉心と呼ばれる独自の炉心を開発し、負荷率の向上とともに燃料の信頼性をさらに向上させた。

その後、原子力発電量の増加に伴って経済性が高い高燃焼度炉心燃料が要望されるようになり、高経済性炉心燃料の開発を進めてきた。高経済性炉心燃料の開発は、**図4**に示すようにステップを踏んで進めており、取出し燃焼度を約33 GWd/t、約39 GWd/tと燃料の信頼性を確認しながら、段階的に高燃焼度化を図っている。各ステップで燃料サイクル費を現行燃料に対し10%ずつ低減することを目標としている。取出し燃焼度が大きくなるに従ってウラン濃縮度を増加させるが、各ステップで中性子の平均エネルギーをほぼ同じとするため、水対燃料体積比を大きくする必要があり、集合体の中に設置する水ロッドの断面積を増加させている。

ステップI燃料の最初の製品は昭和62年3月に納入した東京電力株式会社福島第二原子力発電所2号機(以下、福島第二・2号機と言う。)第3回取替燃料である。その後、順次他のBWRに納入しており、これまでに合計で約2,500体装荷、燃料集合体平均燃焼度約24 GWd/tまでの実績を積んでいる。また、柏崎刈羽5号機では、国内で初めて全炉心にステップ

I燃料を装荷した。この炉心では、上記ステップI燃料の効果のほかに、平衡炉心を模擬して燃料の反応度に応じた初装荷3種類濃縮度燃料集合体採用の効果が加わり、その燃料取出燃焼度は約20%増加するものと予想されている。

ステップII燃料は、平成2年3月に福島第二・2号機で先行使用燃料8体の1サイクル目の運転を終了した。この間、新型丸セルスペーサの特徴により、ステップI燃料に比べて15%の熱的余裕(最小限界出力比)の改善効果を得ている。また、照射後の外観検査などにより、燃料集合体が健全であることを確認した。実用化は平成3年の予定である。

さらに高燃焼度化による燃料サイクル費低減を目指したステップIII燃料を開発した。

3.2.2 計装制御

BWRの計装制御では、**図5**に示すように近年進歩の著しいデジタル制御技術、光多重伝送技術などを駆使し、総合デジタルネットワーク化を推進している。中央監視制御システムとしては、従来計装と調和をとりながら計算機を積極的に活用し、プラント自動化と合わせてマンマシンインタフェースの向上を図ったNUCamm-80を実用化し、運転実績も上がっている。中でも、柏崎刈羽5号機では、放射性廃棄物処理設備にNUCamm-80をさらに発展させ、CRTタッチオペレーションなどを含め、全面的にデジタル化技術を採用している。これらの技術をもとに、プラント全体へのデジタル化、光多重伝送の適用拡大、制御棒操作など自動化範囲の拡大、マンマシンインタフェースの改良など、いっそうの運転

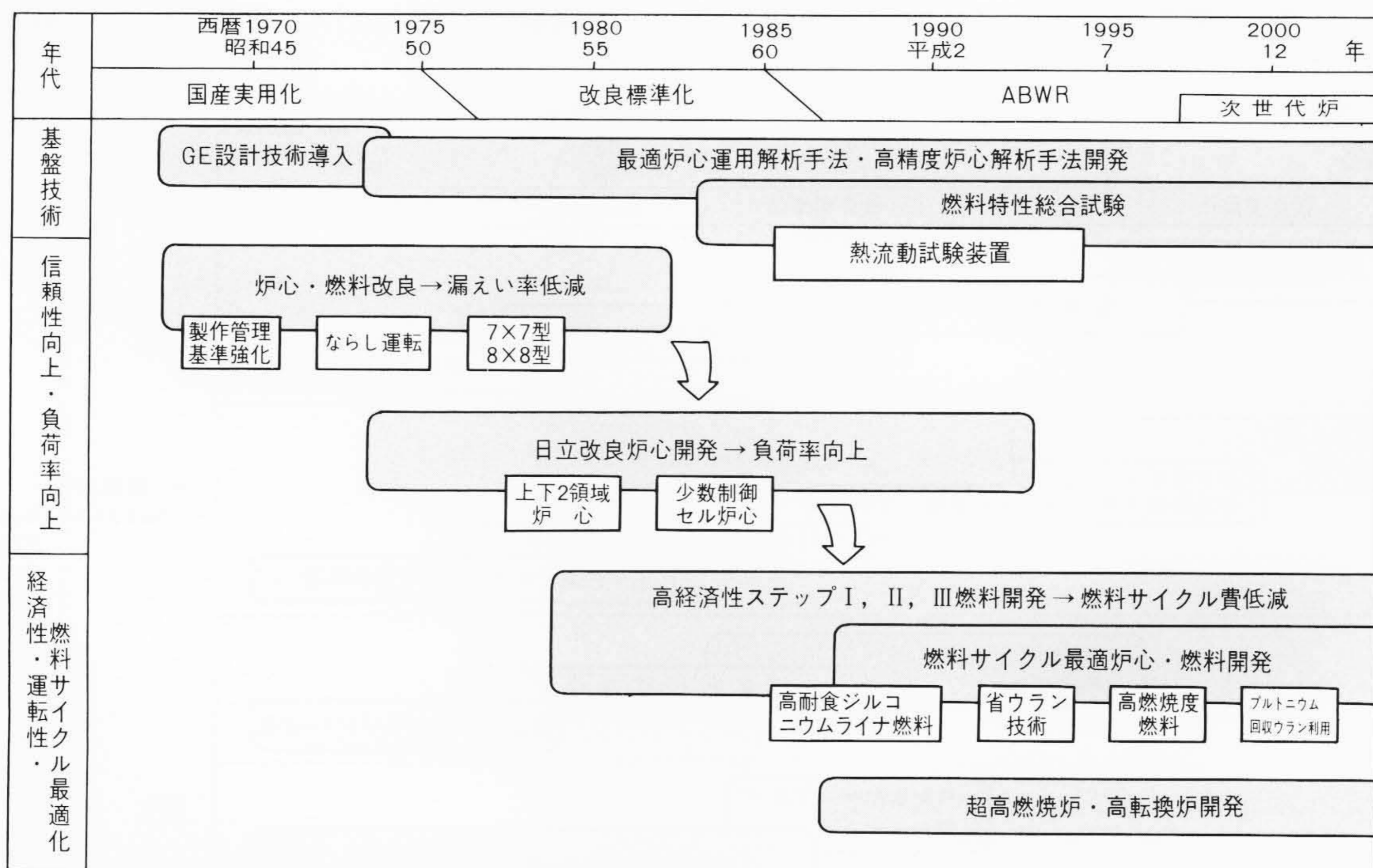


図3 炉心・燃料改良開発の経緯 燃料経済性をいっそう向上させるには、少ないウランでより高い燃焼度を達成することが最も効果的であり、高燃焼度、省ウラン技術を駆使した高経済性炉心・燃料の開発に取り組んでいる。

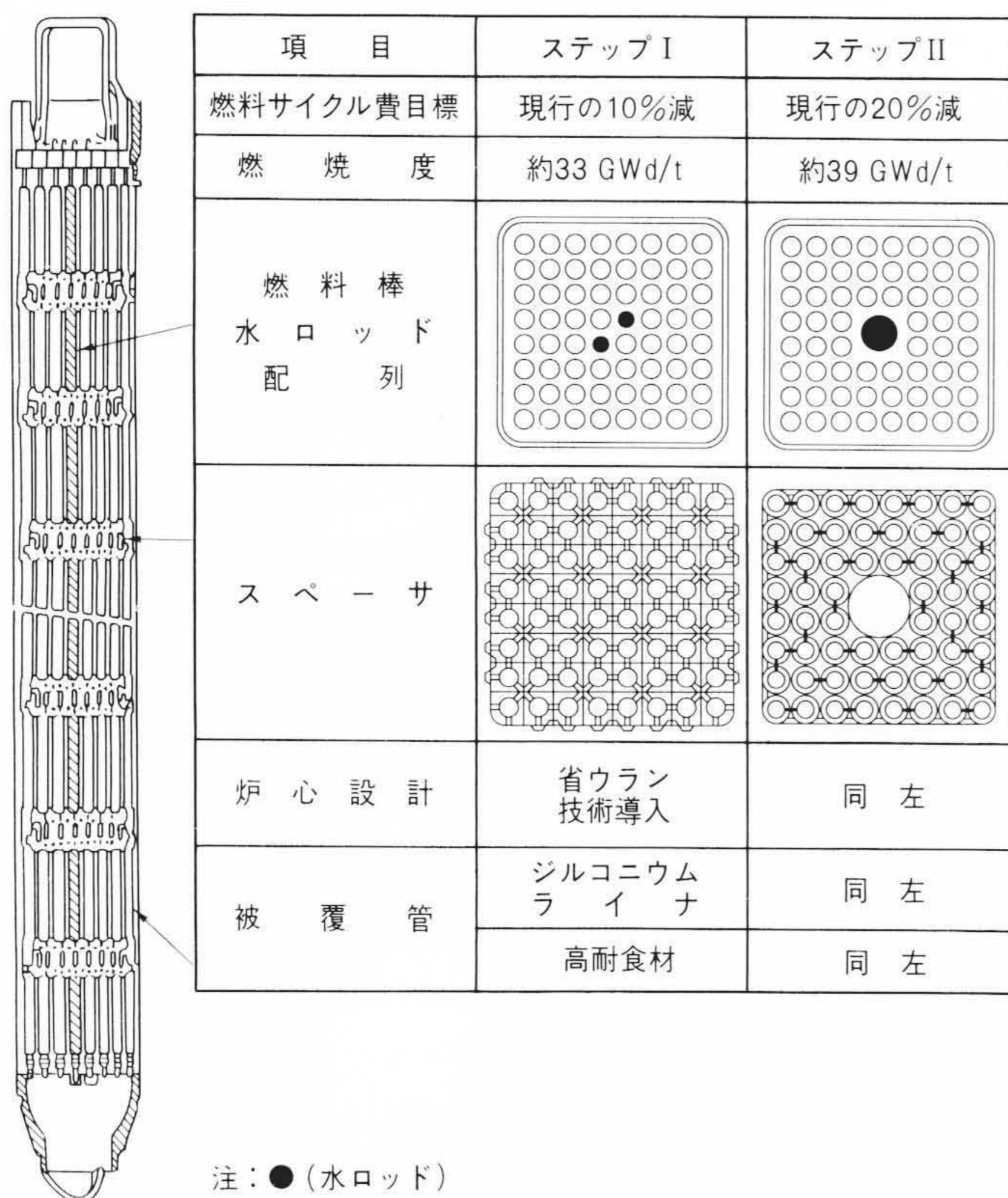


図4 高経済性BWR燃料の特徴 運転実績を積み重ねながら、段階的に燃料サイクル費低減を達成する。

監視性の向上を追求すべく、新しいタイプの中央監視制御システムNUCamm-90を開発し、ABWR適用へ向け展開中である。

3.2.3 安全・耐震技術

安全研究については、図6に示すように開発当初から力を

注ぎ、事故時の現象確認試験を行った後、大型の炉心スプレー試験や複数チャンネルブローダウン試験を電力会社との共同研究によって実施し、安全性を実証してきた。これらの試験により得られた知見をもとに、新しい安全解析コードSAFERを開発し、ABWRなどの安全設計に用いている。ABWRはBWRの安全特性に加え、インターナルポンプ、改良型制御棒駆動機構などのABWR特有技術を採用したことによる長所を十分に反映し、さらに安全性、信頼性の優れた特性を持っている。

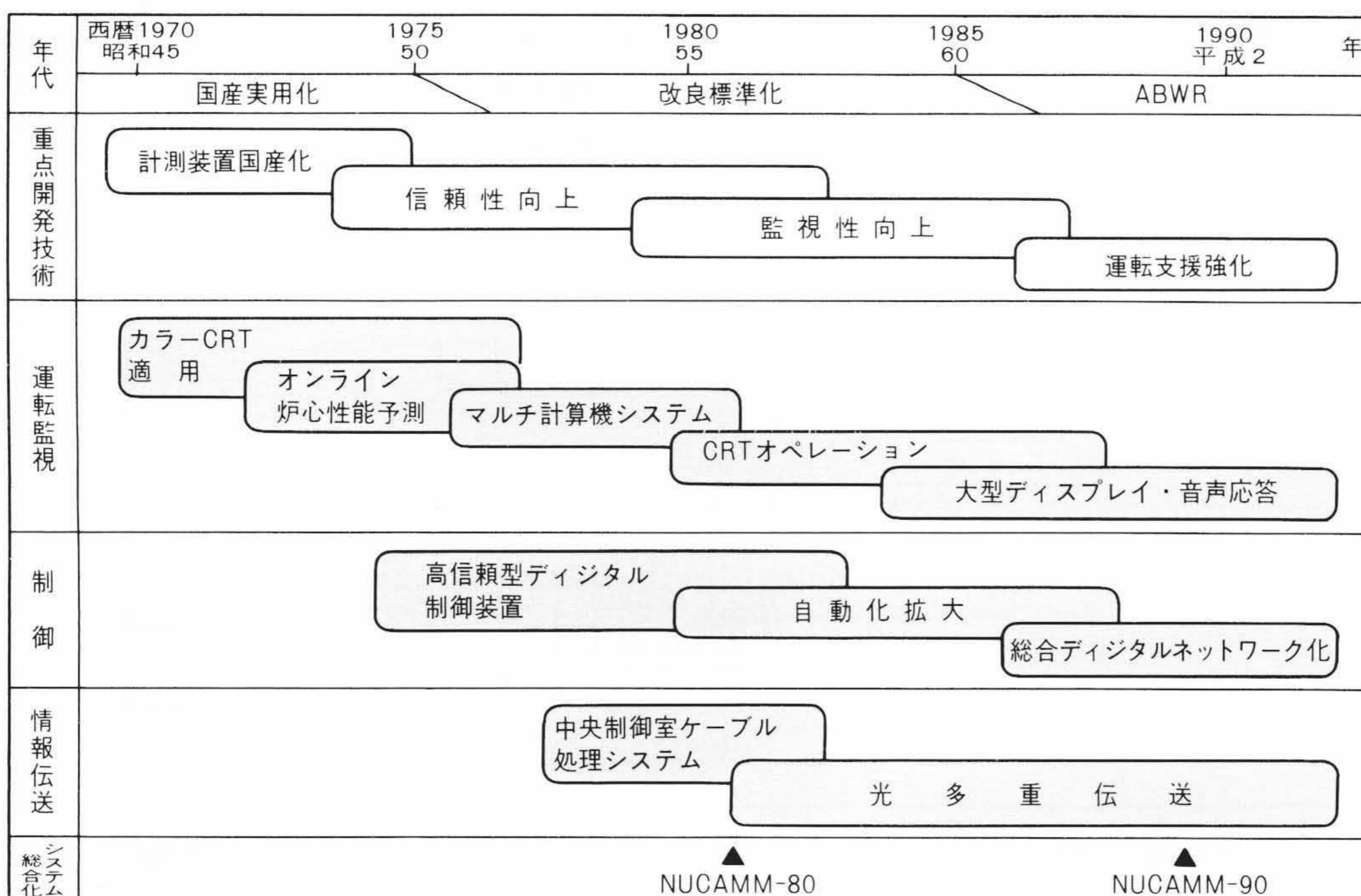
最近では、いっそうの安全性向上を図るため、確率論的安全評価研究、人的エラーを低減するためのヒューマンファクタ研究などを推進している。

耐震技術に関しては、図6に示すように機械・電気設備の耐震設計法、設備単体ごとの動的機能の実証および大型機器・構造物耐震実証試験を行ってきたが、さらにこれを進める形で機器・配管・電気計装設備全体のシステム性能の実証試験を計画している。平成2年半ばから財団法人原子力工学試験センターの1,000 t振動台を用いて実施している非常用ディーゼル発電機システムの耐震実証試験は、前例のない大規模システム試験として国内外から注目を集めている。

また、耐震技術高度化として、免震・制震構造などを用いた安全裕度の向上と合理化、および立地点拡大を目的とした第四紀層立地技術などの研究を進めている。

3.2.4 水質管理・材料技術

原子力発電プラント数の増加に伴い、保守・点検時に作業従事者が受ける放射線量を低減することは、プラント信頼性確保の上からますます重要となってきた。日立製作所では、放射線量低減のために、その原因となる機器・配管内面



注：略語説明
NUCamm (Nuclear Power Plant Control Complex with Advanced Man-Machine Interfaces)

図5 計装制御技術の流れ エレクトロニクスなどの最新技術を取り入れ、運転監視性の向上と総合デジタルネットワーク化を推進している。

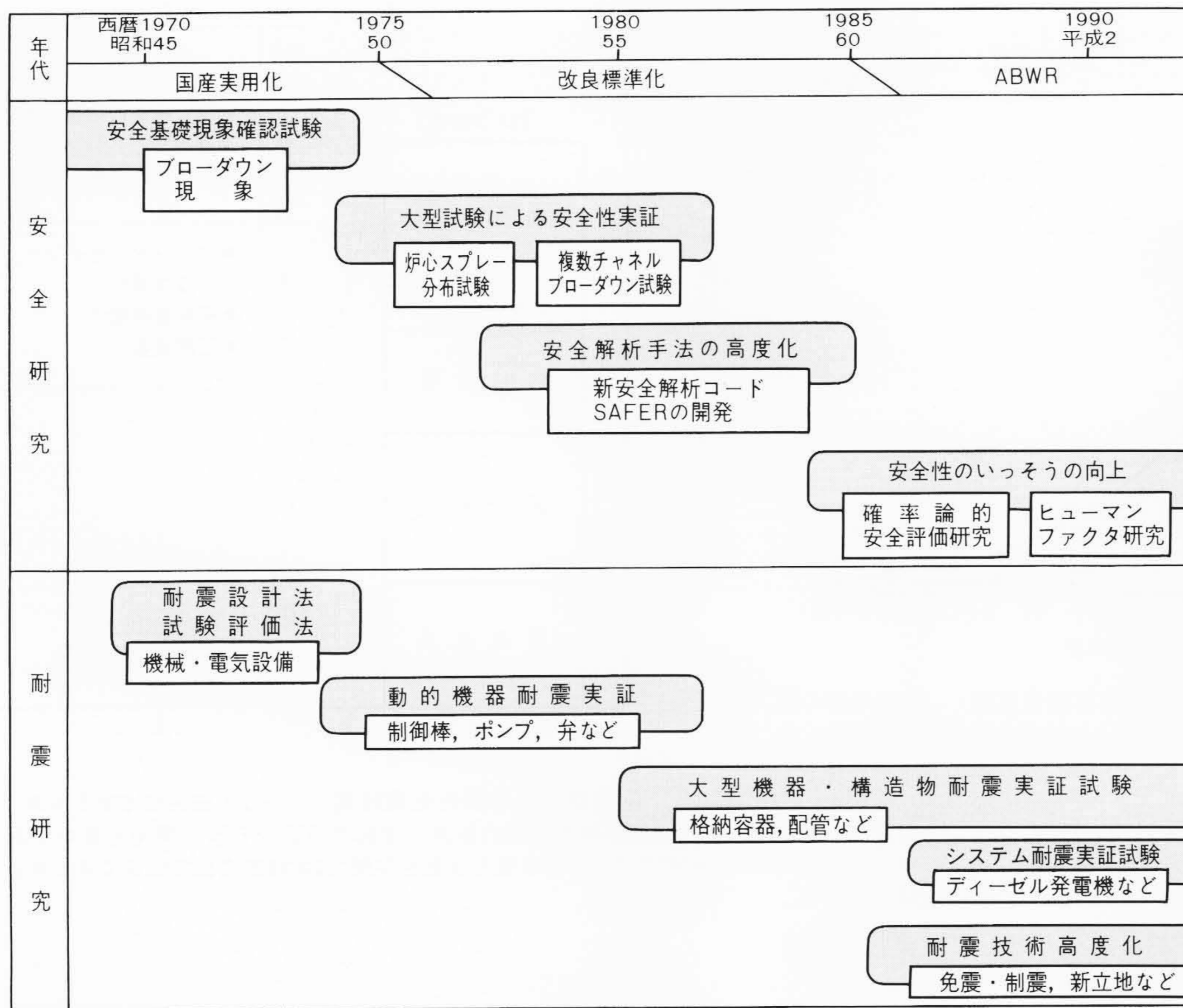


図6 安全・耐震関連研究の流れ 原子力プラントのいっそうの信頼性、安全性の向上、立地点の拡大などを旨として、安全・耐震研究に取り組んでいる。

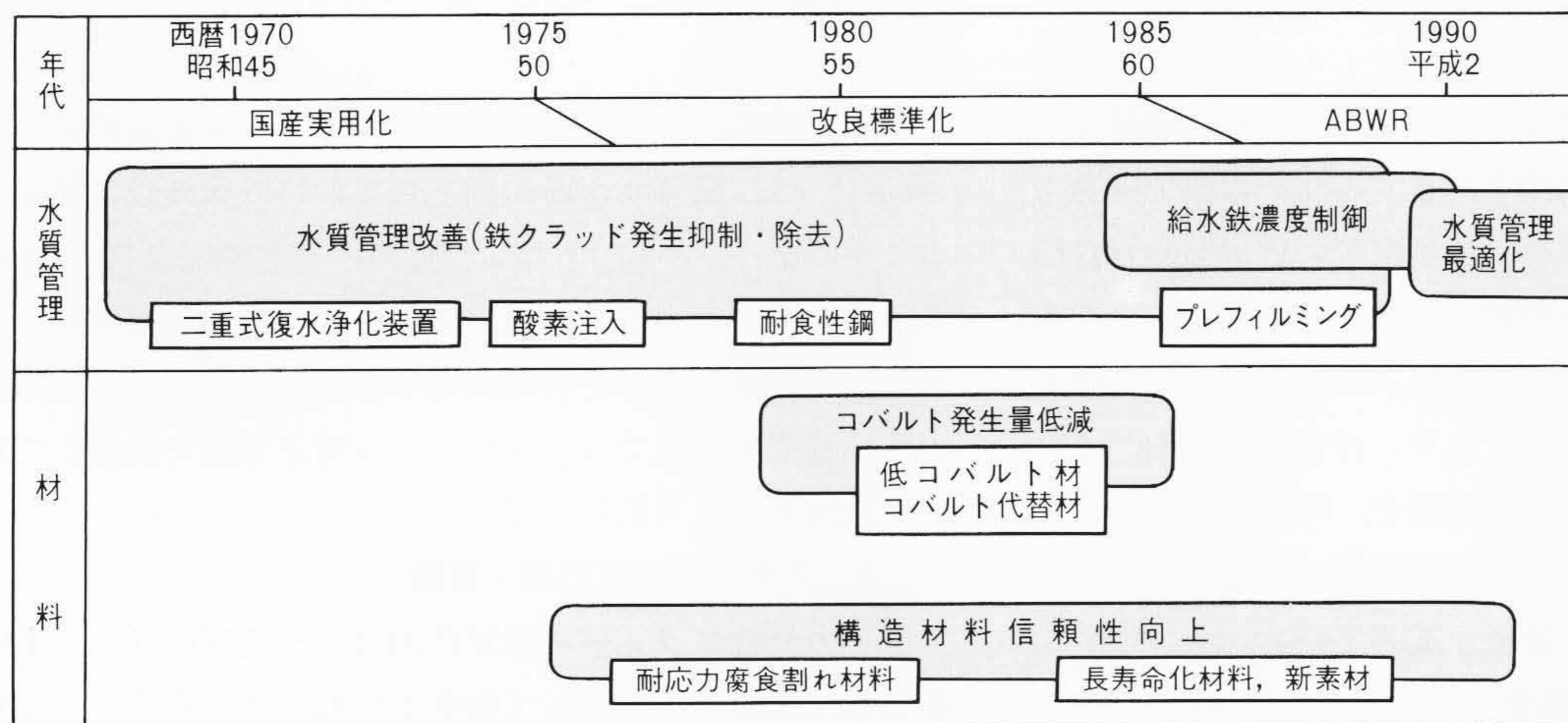


図7 水質管理・材料技術開発経緯 水質管理・材料技術は、基盤技術として早くから重点的に開発を進めており、プラント信頼性の向上、長寿命化などに生かされている。

への付着放射能を少なくすることを最重点課題として技術開発を推進してきた。

プラント停止時の線量率は、腐食生成物の放射化物、特に⁶⁰Co放射能の付着であることに着目し、図7に示すようにコバルトおよび放射能のキャリアである鉄クラッドの発生を低減する技術を開発してきた。昭和50年代に開発した設計面での水質管理改善、および材料選定改善の技術は、昭和59年に営業運転を開始した改良標準化初号機である福島第二・2号機に採用され、第1回定期検査の作業員の受ける放射線量は改良標準化の当初の低減目標値2人・Svを十分に達成する成果

が得られた。

福島第二・2号機の運転経験から、これらの改善効果をさらに高めるには、プラント運転開始後の給水鉄濃度制御が重要であることが判明し、福島第二・4号機以降のプラントに採用している。また、プラントが出力運転を開始し、炉水の放射能濃度が上昇する前に、原子炉冷却材再循環配管内面に酸化皮膜を形成させる手法(プレフィルミング)によって放射能の付着を抑制する技術も採用している。

これらの最新技術を採用したプラントの放射線量は、図8に示すように著しく減少し、平成2年に第1回定期検査を終

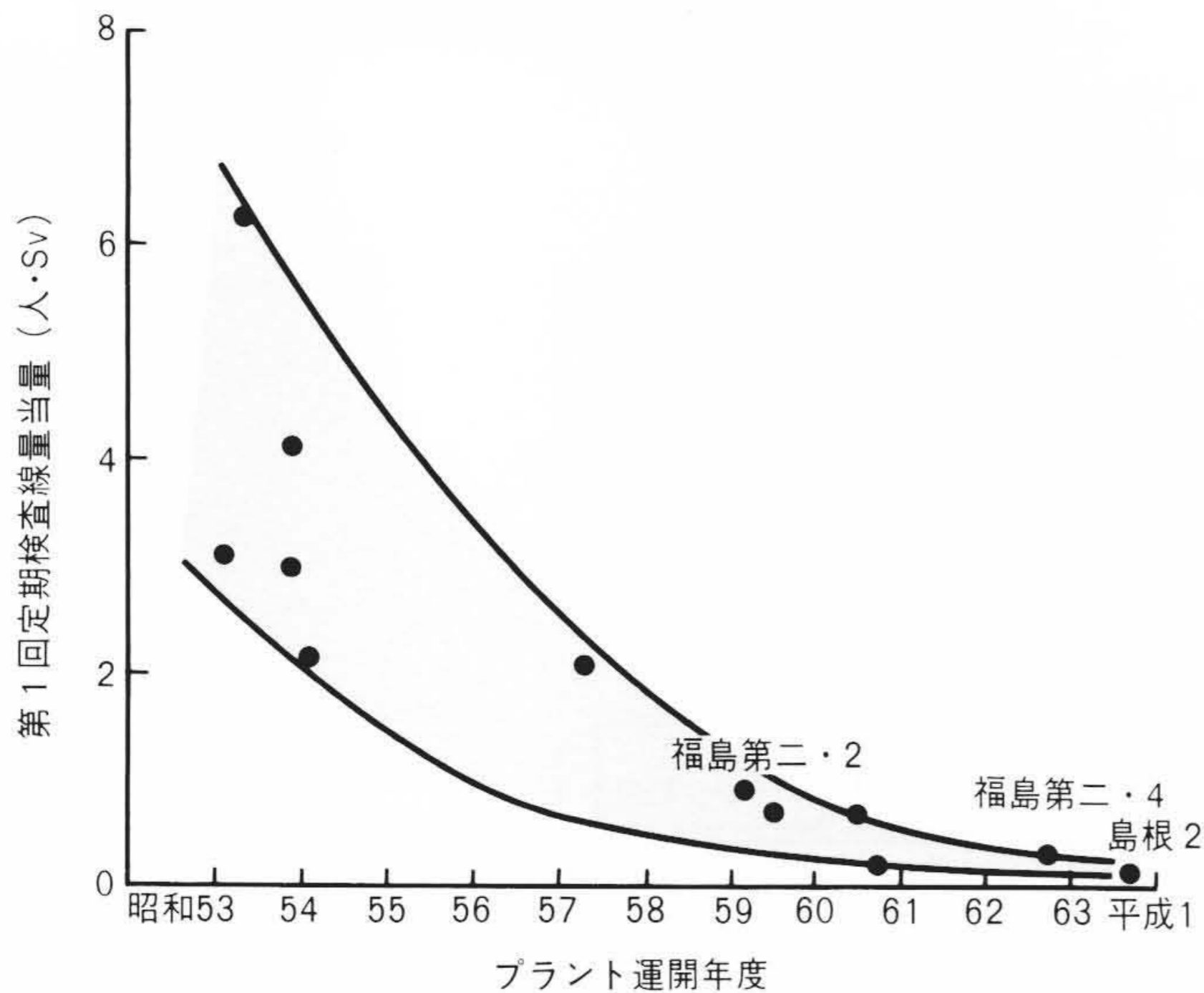


図8 BWRプラント第1回定期検査放射線量実績 作業場所の雰囲気線量率低減と作業時間短縮の両面から総合的な技術開発を進め、放射線量を着実に低減してきた。

えた島根2号機では、0.15人・Svの線量当量を記録している。

水質管理については、放射線量低減とともに廃棄物発生量低減に着目し、復水浄化系の改良開発を行ってきた。また、増加するプラントの水質管理の信頼性を上げる手段として、水質診断技術などの計算機による予防保全技術を開発している。

一方、原子炉周りの構造材などについて、その長期健全性の確認といっそうの信頼性裕度を付与するための研究開発もたゆみなく続けている。ステンレス鋼配管の応力腐食割れ防止技術の適用以来、予防保全の観点からニッケル基合金の改良など実機適用を進めてきた。現在は、エネルギー安定供給のためプラント長寿命化の課題もあり、材料寿命予測、モニタリング技術、長寿命材料などの開発を、照射影響も十分考慮して推進している。さらに、各種新素材、機能材料の原子力への利用に向けての開発・評価を進めている。

3.2.5 放射性廃棄物処理・処分

わが国の国情に適した放射性廃棄物処理システムの確立を目指し、発生量低減、減容および最終処分のための安定固化を主軸として技術開発に取り組んでいる。

廃棄物発生量低減に関しては、タービン系への耐食性材料の採用、復水脱塩器樹脂非再生運用など、プラント設計改良と一体となった廃棄物発生量低減策を講じている。

廃棄物の減容に関しては、廃樹脂の焼却分解による無機化減容、不燃性雑固体の圧縮減容などの減容技術の適用推進を図っており、図9に示すようにこれらを全面的に適用した場合のABWRプラントでは、ドラム缶発生本数を年間100本程度にまで低減できる見通しを得ている。

また、廃棄物の固化技術に関しては最近の廃棄物埋設処分

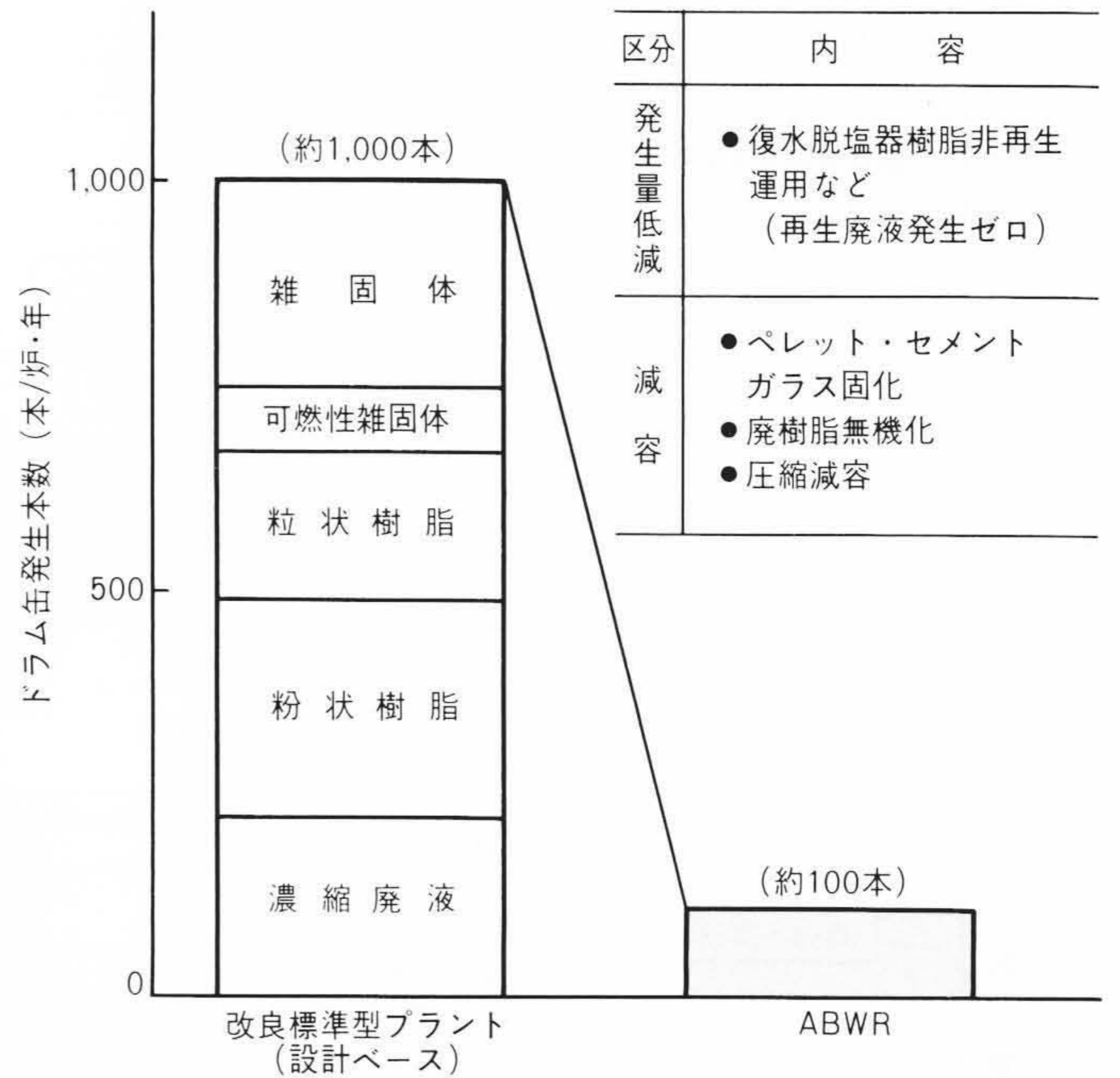


図9 廃棄物の減容固化処理技術 ドラム缶発生本数を低減させるため、廃棄物発生量の低減と減容の両面から技術開発を進めており、ABWRではドラム缶発生本数を年間100本程度にまで低減できる見通しである。

動向に対応し、長期安定性に優れた無機固化(セメントガラス固化)技術を開発し、現在、実プラント用の設備を建設中である。

発電所敷地内に貯蔵保管されているドラム缶詰め固化体(廃棄体)は、発電所から搬出されて最終貯蔵施設に埋設されることになっている。ドラム缶詰めの放射性廃棄物固化体を、原子力発電所から貯蔵施設に搬出する際に、表面線量、汚染密度、圧縮強度などを自動測定する設備を開発した。心臓部の核種別濃度測定では、スペクトル補正方式を採用して高精度・迅速測定を可能にしている。

3.2.6 プラント配置計画・建設

原子力発電プラントの配置計画は、短期間にサイト条件、顧客ニーズなどを考慮して効率よく取りまとめることが望まれる。このため、日立製作所は従来のプラスチックモデルに代わり、知識工学、三次元表示コンピュータグラフィック、プラント総合データベース構築などの最新技術を取り入れ、3D-CAD(三次元プラントレイアウト計画CAD)システムを開発した。このシステムはすでに実機に適用し、その有効性が実証されている。

一方、建設工事は工期短縮、効率向上を目指し、

- (1) 現地作業の削減……モジュールブロック化の拡大
- (2) 現地作業工程の精度向上……建築並行作業調整および拡大
- (3) 現地作業の効率化……作業の機械化・自動化
- (4) 建設工事管理の精度向上……プロジェクト管理の徹底

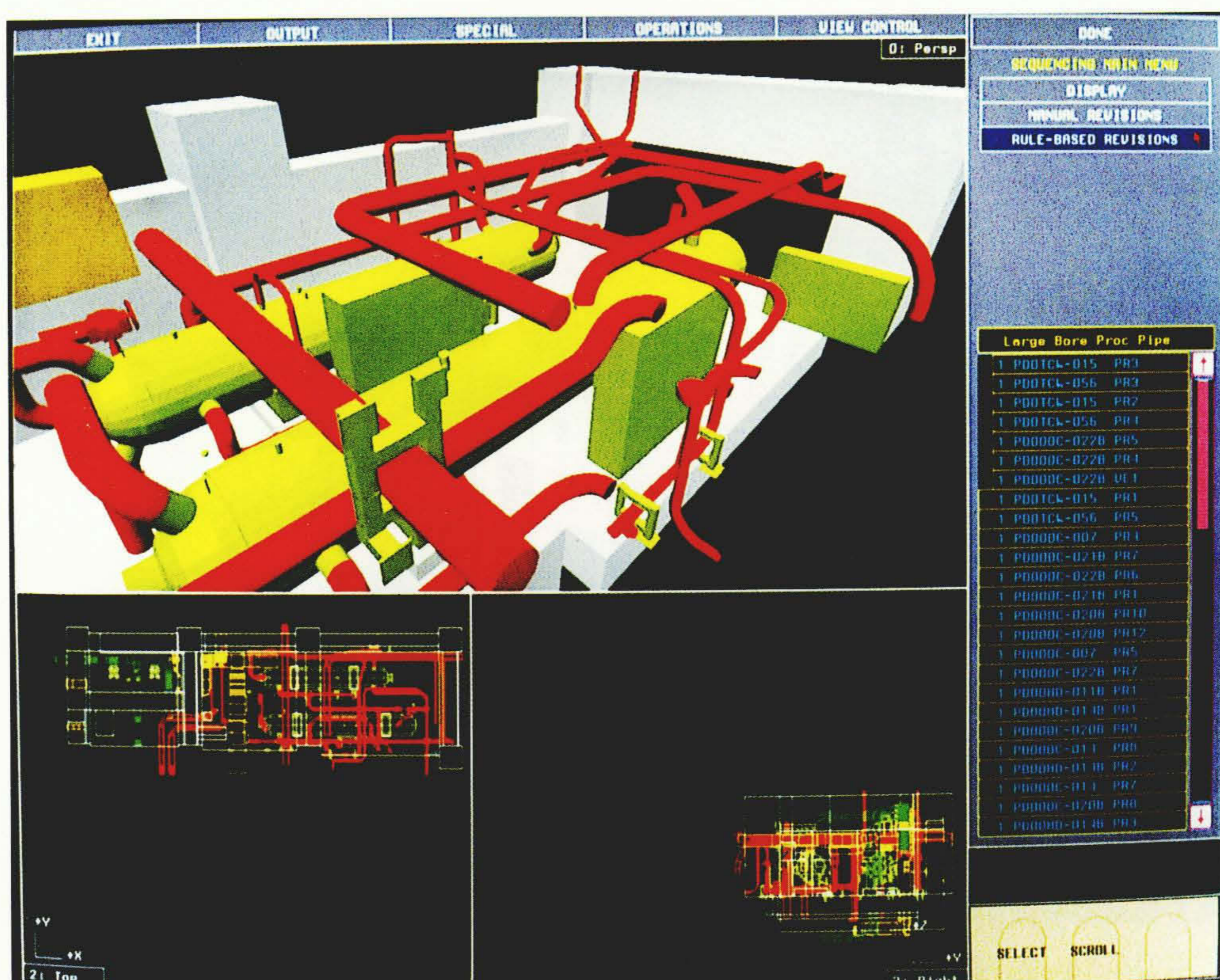


図10 三次元プラント建設CAEシステムによる据付け手順計画例 配管・機器などの三次元表示とともに、据付け手順が表示される。

などを推進してきた。

また、建設工事を支援するため、上流側の3D-CADのデータを有効に活用したC-CAE(三次元プラント建設計画CAE)システムを開発し、一部実用化した。このシステムは、建設作業シミュレーションシステム、スケジューリングシステム、プロジェクト管理システムおよびデータベースシステムから構成される。これらのシステムは、すべて工場と現地の間をオンラインネットワークで接続し、運用することができる。C-CAEによる据付け手順計画例を図10に示す。

3.2.7 運転プラント予防保全技術

最近、運転プラントの増加に伴い、これらプラントの稼働率向上、予防保全の強化および保守性の改善が、従来にも増して重要になっている。日立製作所は、プラントの計画・建設段階での保全性設計から運転・保守段階での予防保全作業に至るまで一貫した予防保全活動を実施している。すでに担当部門の強化、拡充を図るとともに、以下に述べるような運転プラントサービスを展開している。

運転プラントの予防保全計画の精度向上と充実を図るため、コンピュータによる高度化を推進している。すなわち、設備機器情報、点検保守履歴情報などを多目的に利用できるデータベースの構築、さらに制御棒駆動機構のような主要機器の余寿命診断をエキスパートシステム化するなど、総合的な予防保全システムを開発し、一部運用している。また、定期検査期間の短縮、点検保守作業時に受ける放射線量の低減を目的とし、省力化・遠隔化のための自動化機器の開発・導入を

図ってきている。特に最近では、人工知能を応用した高度な機能を持つロボットなどの開発に重点を置いて進めている。

4 ABWR技術

従来BWRの改良技術は、より安全で安定した電力供給能力を持つ発電プラントの実現に向けて培われてきた。これらは国の改良標準化の動きの中で、プラント特性に対する目標として具体的に集約され、現在の改良標準型BWRプラントはこれら目標を上回る実績を生み出してきた。

これら実績のある技術をベースに、欧米などで良好な実績のある要素技術を取り込んでABWRが開発された。このプラントの特性は、従来の改良標準型BWRの実績をしのぐものと期待されている。

ABWRの特徴は、外部ループ方式の原子炉再循環システムの代わりに、原子炉内直付けのインターナルポンプ方式を採用したこと、水圧駆動の制御棒駆動機構に代え水圧・電動両用方式の改良型制御棒駆動機構を採用したこと、建屋一体型の鉄筋コンクリート製原子炉格納容器を採用したことなどである。このため、プラントの安全性、運転性、保守性が向上したほか、プラント全体がコンパクトに仕上がりに経済性の向上をももたらしている。これらの改良技術は、基礎・要素試験、確証・実証試験などを経て実用の段階にある。

ABWRは、従来型BWRの出力を上回る電気出力1,350 MW級として開発を完了し、現在、柏崎刈羽6,7号機用に詳細設計を進めている。ABWRの外観を図11に示す。

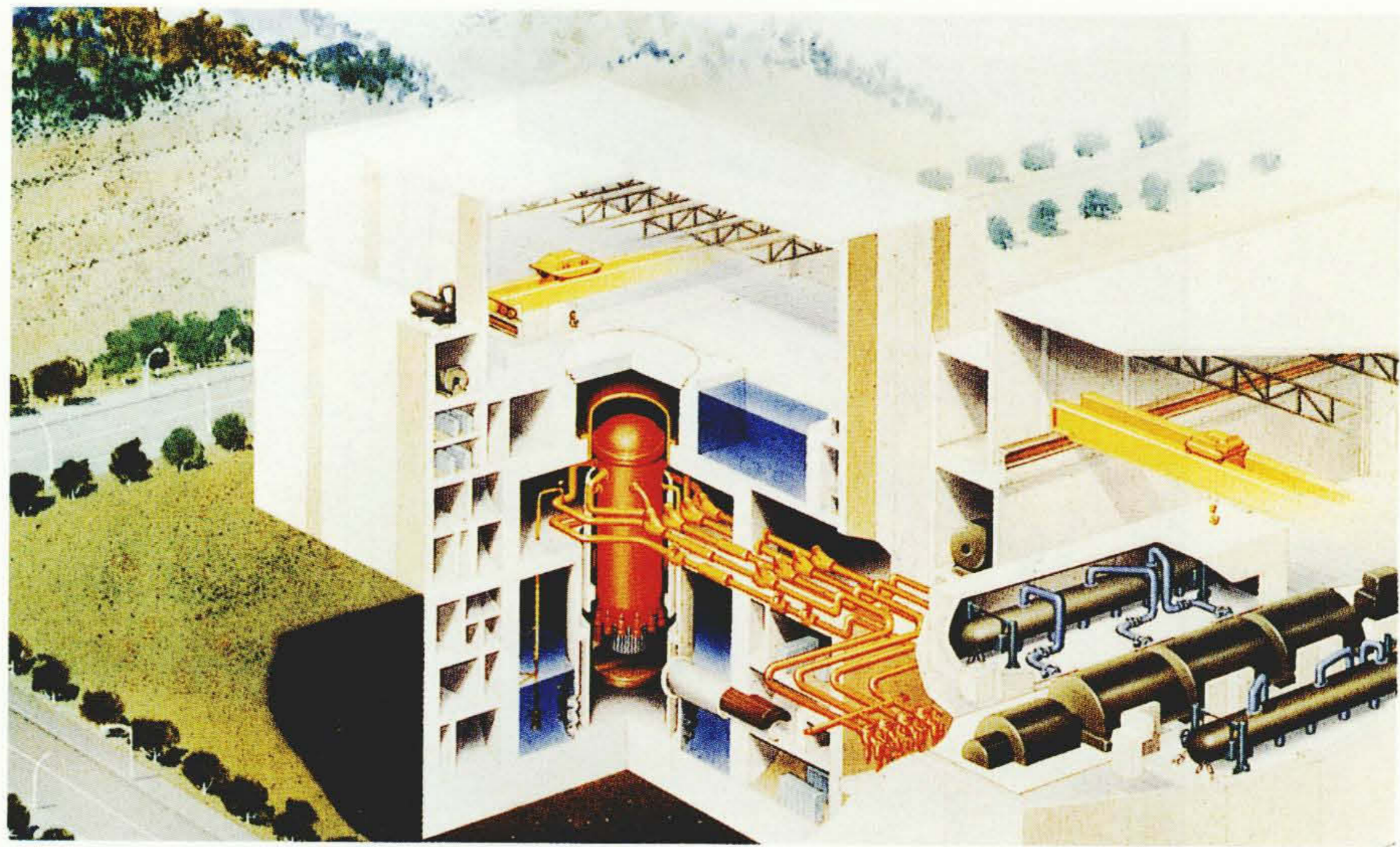


図11 ABWR外観 ABWRは、安全性や運転保守性の向上のほか、プラント全体がコンパクトに仕上がりに経済性の向上をもたらしている。

5 次世代BWR炉心技術

軽水炉が電力供給の主力である期間は、今後長期化すると考えられる。このため、軽水炉の増加に伴いウラン需要も将来増加すると予想される。しかし、長期的なエネルギー安定供給確保の観点からは、ウラン資源をできるだけ有効に活用するために、今後はウラン資源節約(省ウラン化)とウラン以外の燃料資源(プルトニウムなど)の有効利用が軽水炉炉心開発にとって重要となる。さらに、使用済み燃料発生量の低減などの原子燃料サイクル下流条件にも柔軟に対応できること

も必要となる。

このような、軽水炉炉心への多様なニーズを踏まえると、次世代BWR炉心は、ウラン燃料高燃焼度化による燃料廃棄物低減と省ウラン技術を活用した高燃焼型BWRと、プルトニウム利用率を上げるためにウラン・プルトニウム混合酸化物を燃料とした高転換型BWR炉心のどちらにも対応可能な炉心構成とすることが望ましい。

図12は、このような次世代BWR炉心の構想を示したもので、広翼十字型制御棒と大型燃料集合体を採用して、燃料と制御棒の取り替えだけで、高燃焼型BWR炉心にも高転換型BWR炉心にも転用できる特徴がある。

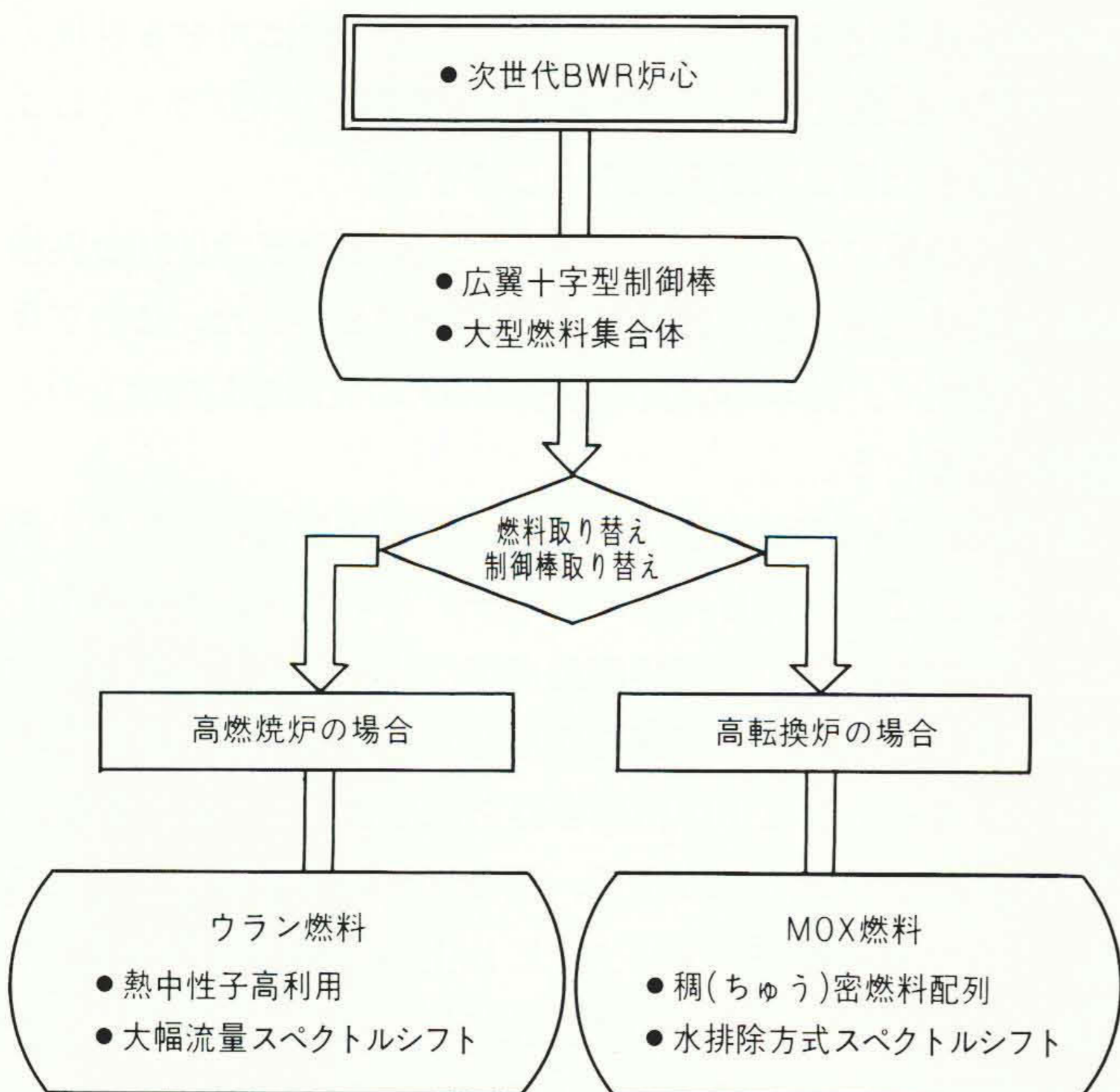
6 結 言

BWR技術開発への取り組みおよび今後の展開を、日立製作所の活動を中心に概説した。

原子力発電は、実用化以来20年にわたる官民一体となった努力により、わが国の社会を支える経済性に優れたエネルギー源として定着してきた。さらに、地球環境問題などを考慮すれば、長期的なエネルギー確保の観点から、原子力発電の重要性はますます高まるものと考えられる。このような状況のもとで、原子力産業の一翼を担う日立製作所は、国・電力会社の指導のもとに、より高度な信頼性と経済性を追求し、たゆまぬ努力を続けていく考えである。これらの努力を通して、原子力発電が広く国民の支持を得て、わが国の経済および社会生活に大きく寄与できるように、21世紀に向けての原子力の発展に貢献したいと願うものである。

参考文献

- 1) 総合エネルギー調査会中間報告総論：地球規模のエネルギー新潮流への挑戦(平2-6)
- 2) 杉野，外：軽水炉の現状と今後の動向，日立評論，4，343～350(昭63-4)



注：略語説明 MOX [Mixed Oxide(ウラン・プルトニウム混合酸化物)]

図12 次世代BWR炉心の構想 広翼十字型制御棒と大型燃料集合体の取り替えで、高燃焼型BWR炉心にも高転換型BWR炉心にも転用できる特徴がある。