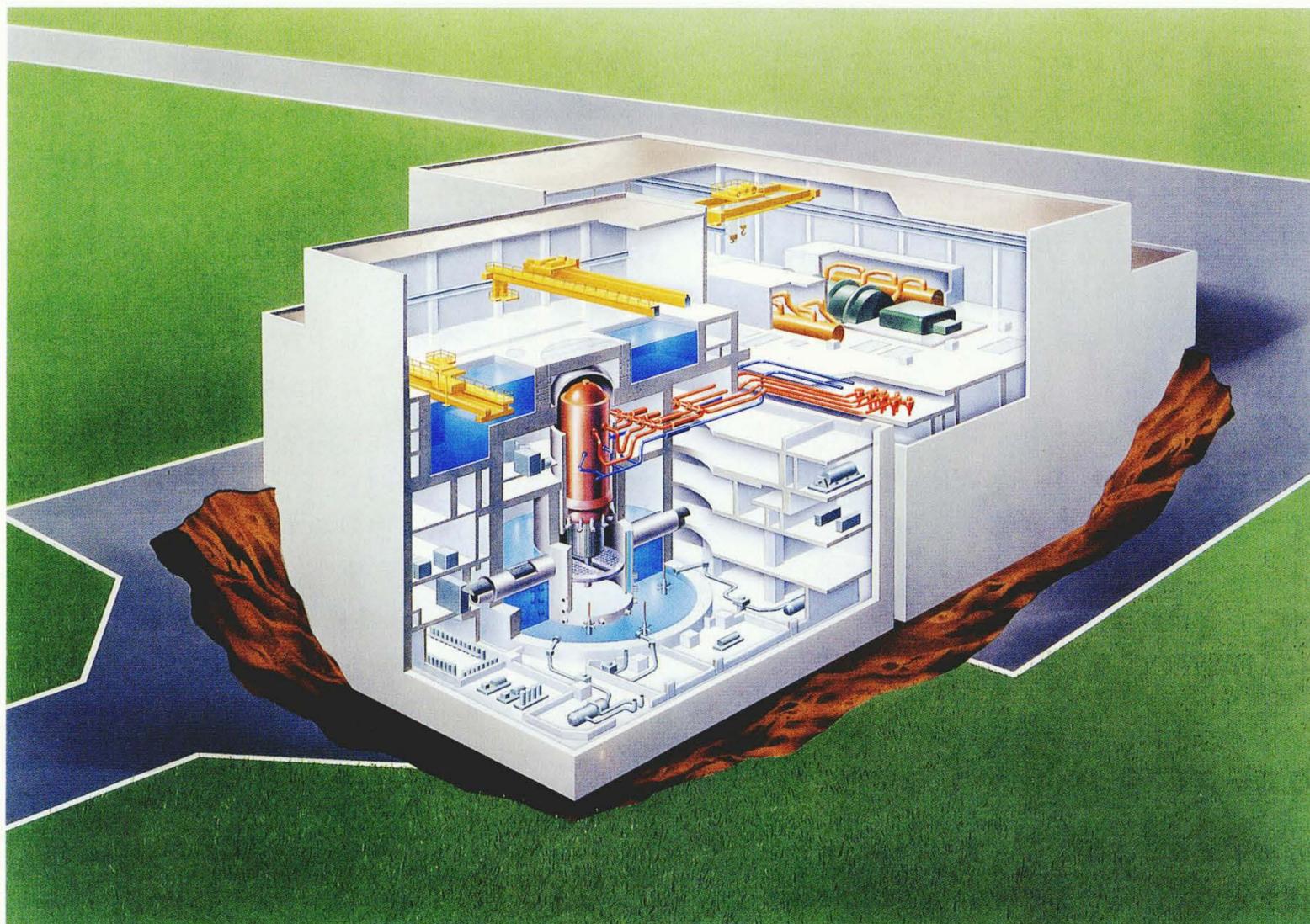


BWRの技術開発

Development of the New Technology for BWR

林 勉* *Tsutomu Hayashi*

加藤洋明** *Yōmei Katō*



ABWR(改良型沸騰水型原子炉)の構造 今までのBWR(沸騰水型原子炉)の技術を集大成してシステム全体を改良し、総合特性をよりいっそう高めたプラントである。

日立製作所は、昭和40年代の初めに米国GE社からBWR(沸騰水型原子炉)の技術を導入して以来、数多くの原子力発電所の建設に携わってきた。またこの間、多くの技術改善を行って原子力発電所の運転実績の向上に寄与してきた。今後当分の間、軽水炉主流の時代が続くと予想されるので、信頼性のいっそうの向上のために、電力会社と一体になって予防保

全を強力に推進することが重要と考える。また運転性、安全性の観点から技術の高度化に対するいっそうの努力を続けるとともに、今までのBWR技術を集大成したABWR(改良型沸騰水型原子炉)の定着化を図り、さらに21世紀に向かって夢を持ってBWRの技術開発に取り組んでいく。

* 日立製作所 原子力事業部 ** 日立製作所 日立工場 工学博士

1 はじめに

近年、地球環境問題に対する関心が高まり、クリーンなエネルギーが望まれている。日立製作所は、軽水炉によるクリーンで安全な原子力発電がこの要望にこたえて今後とも長期にわたって重要な役割を担うと考え、BWR(沸騰水型原子炉)技術の改良発展に積極的に取り組んでいる。

今や原子力発電は総発電量の中で25%以上を占めるまでになった。この状況下において、原子力発電に第一に求められることは信頼性のいっそうの向上である。そのために、全社関連組織の総力を結集した信頼性向上活動を推進するとともに、電力会社のニーズを十分に反映した予防保全を強力に推進し、発電所の安定運転に寄与していきたいと考えている。また、新プラントの建設に関しては、BWR技術を集大成して最新のABWR(改良型沸騰水型原子炉)を開発し、現在この建設に鋭意取り組んでいる。今後この定着化といっそうの発展を図り原子力発電の期待にこたえていきたい。

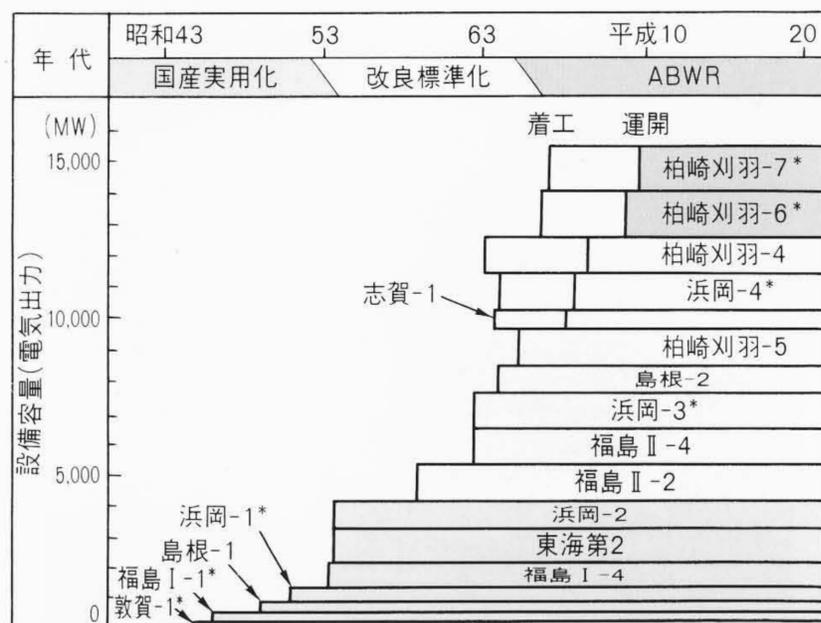
長期的な展望に立つ原子力産業にとっては、これからの原子力産業を担う人材を育成していくことが必要であり、このためには魅力ある原子力開発が望まれ、21世紀に向けて夢のある原子力技術の高度化を進めていく考えである。ここでは、日立製作所のBWRに対する取組について述べる。

2 日立製作所のBWR発電プラントの実績

2.1 プラント建設

(1) 日立製作所のBWR発電プラント建設の実績

日立製作所は今まで国内BWR12基(電気出力合計9,800 MW)の建設に携わり(図1)、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、東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所4号機(以下、柏崎刈羽4号機と言う。)およびABWR初号機である同社柏崎刈羽原子力発電所6・7号機(以下、柏崎刈羽6・7号機と言う。)の建設を順調に進めている。これまでも日立製作所は、国内初号機(日本原子力発電株式会社敦賀発電所1号機)、国産初号機(中国電力株式会社島根原子力発電所1号機)、改良標準化初号機(東京電力株式会社福島第二原子力発電所2号機)など、開発のエポックとなるプラントの建設に参画してきた。現在は、ABWR世界初号機の柏崎刈羽6・7号機建設という、軽水炉にとって新たなステップを踏み出す好



注：* 共同建設

略語説明 ABWR(改良型沸騰水型原子炉)
 柏崎刈羽-4, 5, 6, 7 (東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所4, 5, 6, 7号機)
 浜岡-1, 2, 3, 4 (中部電力株式会社浜岡原子力発電所1, 2, 3, 4号機)
 志賀-1 (北陸電力株式会社志賀原子力発電所1号機)
 島根-1, 2 (中国電力株式会社島根原子力発電所1, 2号機)
 福島I-1, 4・II-2, 4 (東京電力株式会社福島第一原子力発電所1, 4号機, 同社福島第二原子力発電所2, 4号機)
 東海第2 (日本原子力発電株式会社東海第二発電所)
 敦賀-1 (日本原子力発電株式会社敦賀発電所1号機)

図1 日立製作所のBWR建設実績 これまで国内12基のBWR(沸騰水型原子炉)の建設に携わり、現在5基の建設を進めている。

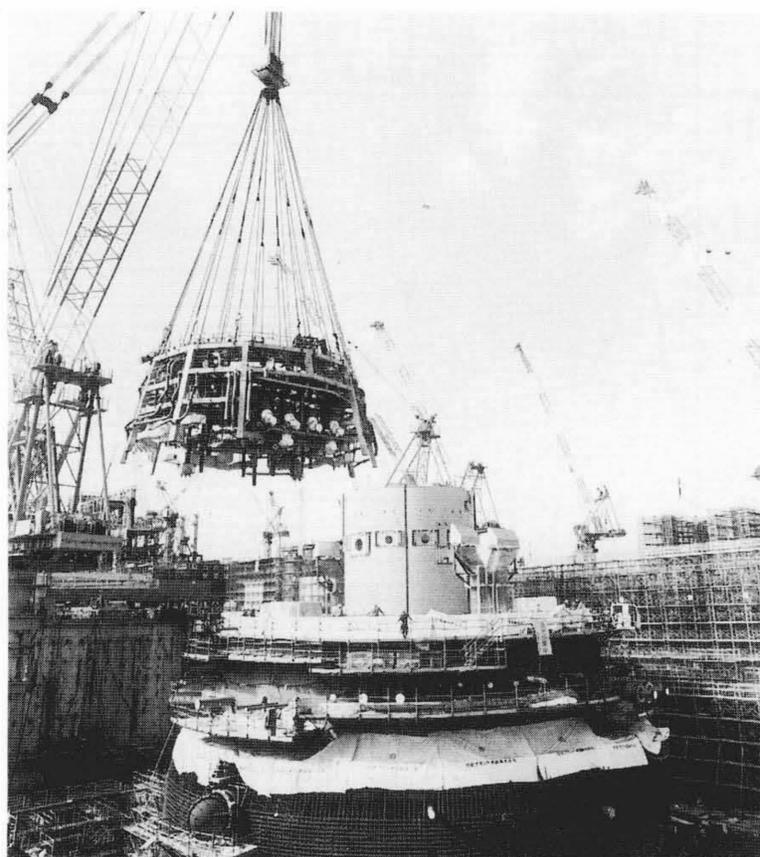
機に、社内の総合力を結集して建設の推進に万全を期している。

(2) 建設工法の改善

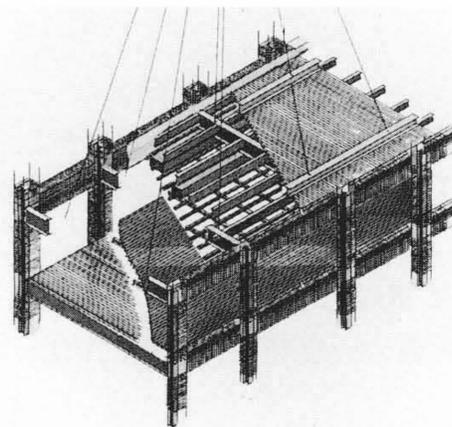
現地作業の効率化と品質確保を図るために、数多くの中・小規模のモジュールを採用すると同時に、大型のモジュール工法を導入してきた(図2)。柏崎刈羽4号機では大型移動式クレーンの活用により、格納容器内機器の大型モジュールや中央制御室ルームモジュールの採用など、据付け工事に大きな成果を得ることができた。これらの計画には、最近広く採用するようになった三次元CADの効果が大きい。

2.2 炉心燃料の改良と適用

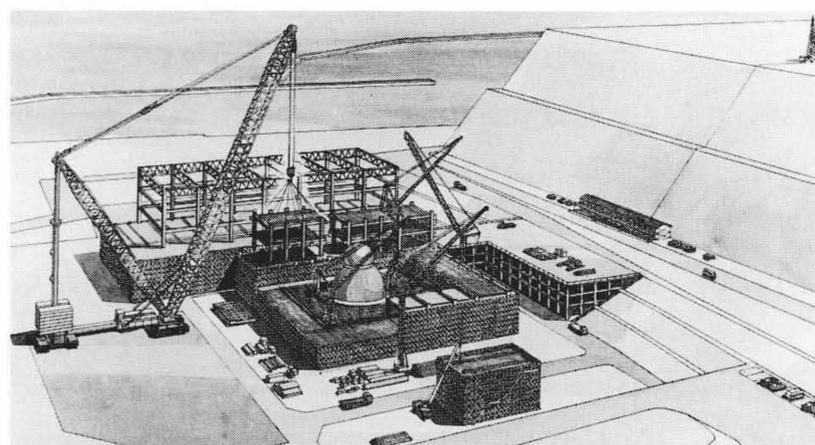
日立製作所は、原子力発電の開発に着手した当初から炉心燃料技術を原子力発電の中核技術と考え、その基礎技術開発を行って性能および信頼性の向上に努めた。これまでに納入した燃料は約1万体になる。さらに近年、原子力の発電量が増加するに従って、信頼性や安全性の高度化に加えよりいっそうの経済性が要望されるようになったので、高経済性ステップI, II, III燃料を順次開



(a) 格納容器内機器大型一体モジュール
(柏崎刈羽-4)



中央制御室モジュール
〔幅(南北)26 m×
奥行き(東西)16 m×
高さ12 m〕



(b) つり込み概略図(柏崎刈羽-4)

図2 建設工法の改善 大型モジュール工法の導入と大型移動式クレーンの活用によって、現地作業の効率化と品質確保を図った。

年 代		昭和 53	58	63	平成 5
材料健全性向上策	SCC対策	低炭素不銹鋼適用(配管・弁類)			
	減肉対策 腐食対策	耐食材適用(配管ほか)		一体型タービンロータ	海水配管ほか
設備強化・経年劣化対策	機械	給水スパーチャ・再循環系機器ほか			
	電気	多重化・デジタル化 監視強化 経年劣化対策		タービン保護計器・主要制御系多重化	自動スタッドテンション・高速燃料取替機ほか導入
線量低減	作業性向上 環境改善 線量率低減	CRD交換・分解洗浄装置、供用期間中検査装置ほか導入			
		遮へい、通路改善		回転体診断装置導入	
		除染、中空糸膜フィルタ設置			

注：略語説明 SCC(応力腐食割れ)，CRD(制御棒駆動装置)

図3 設備改善の実績 発電所の運開後でも、最近の技術を反映するために多くの設備改善を行ってきた。

発して製品化に取り組んでいる。さらに今後は、使用済み燃料の低減やプルトニウムの有効利用など、原子燃料サイクル全体を考慮して長期的な開発を推進していく考えである。

2.3 保守サービス

(1) 設備改善の実績

発電所の運開後も、常に運転経験と最新の技術を反映し、設備改善を図っていくことが重要である(図3)。材料健全性向上策としては、昭和50年代初期から、配管・弁類に主に低炭素ステンレス鋼を採用するなどの応力腐食割れの対策を行った。その後、タービン系などの炭素鋼配管に高耐食性低合金鋼を採用するなどの減肉対策を

実施し、近年では埋設、海水配管の腐食対策へと変遷してきた。機械設備の改善で給水スパージャの更新、電気設備では主要制御系の多重化があげられる。さらに、作業性の向上、環境改善および放射能低減として、制御棒駆動装置の自動交換・自動分解洗浄装置の採用、中空糸膜フィルタの設置などに取り組んできた。

2.4 運転実績

(1) 設備利用率の向上

わが国のBWRは、昭和50年代に配管の応力腐食割れなどの不具合を経験したが、国・電力会社・メーカーが力を結集して改良標準化に取り組み、これらの不具合を

克服してきた。その後、発電電力量の着実な増加に対応して、炉心燃料や運転法の改良による負荷率の向上、定期検査支援設備の改善による定期検査工程の短縮や計装・機器の信頼性向上による計画外停止の低減などにより、設備利用率が向上してきた(図4)。これは、メーカーの技術を積極的に活用しながら改善への努力を進めた電力会社の成果と言える。ABWRではさらに高い目標を掲げ、その実現に向けて最終的な詰めの段階に入っている。

(2) 線量当量の低減

昭和40年代に運開した初期のBWRには、定期検査時

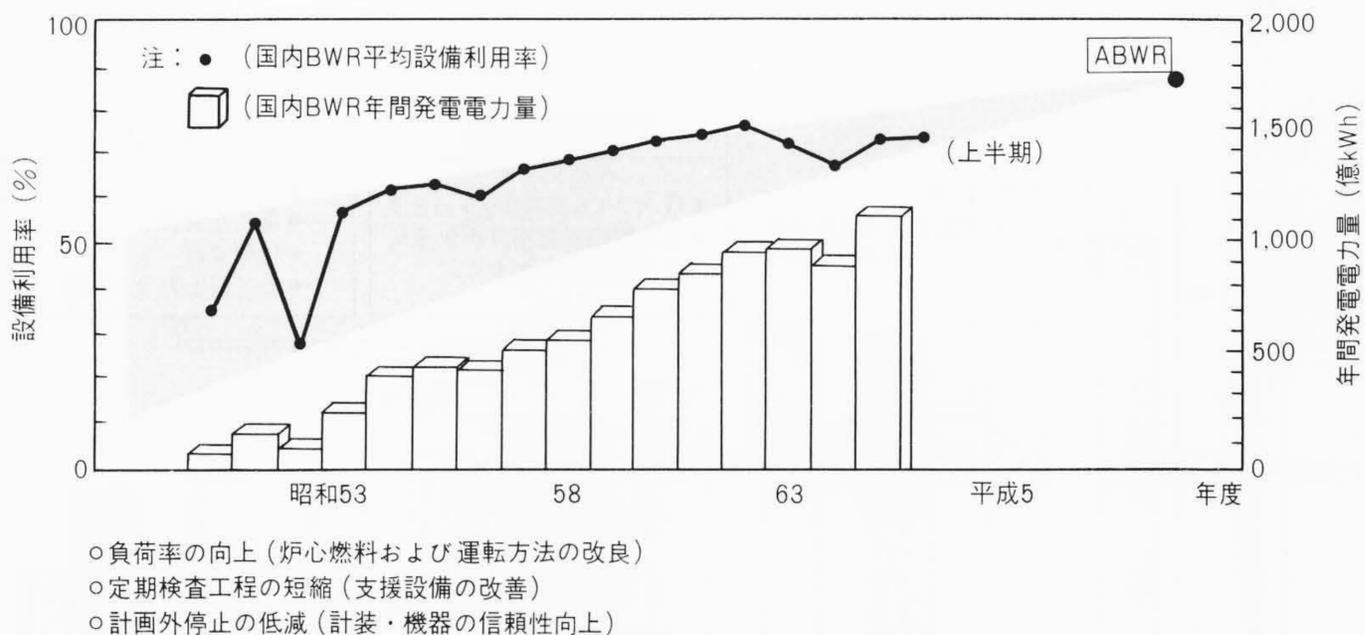
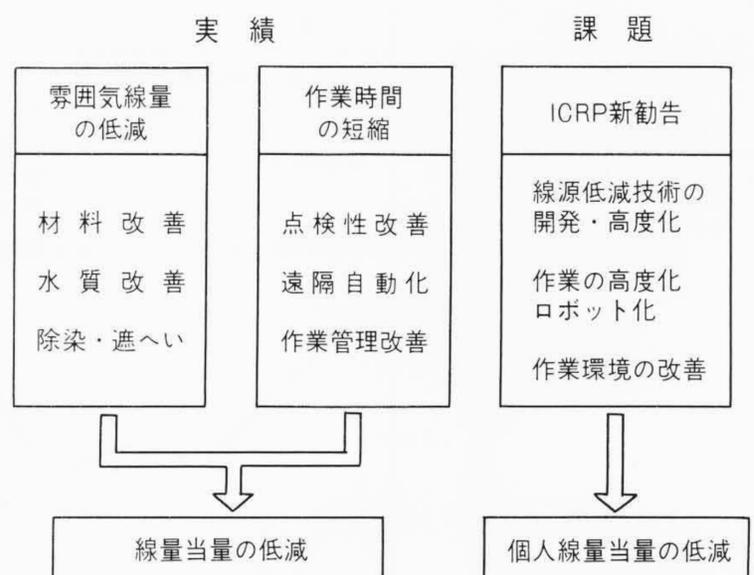
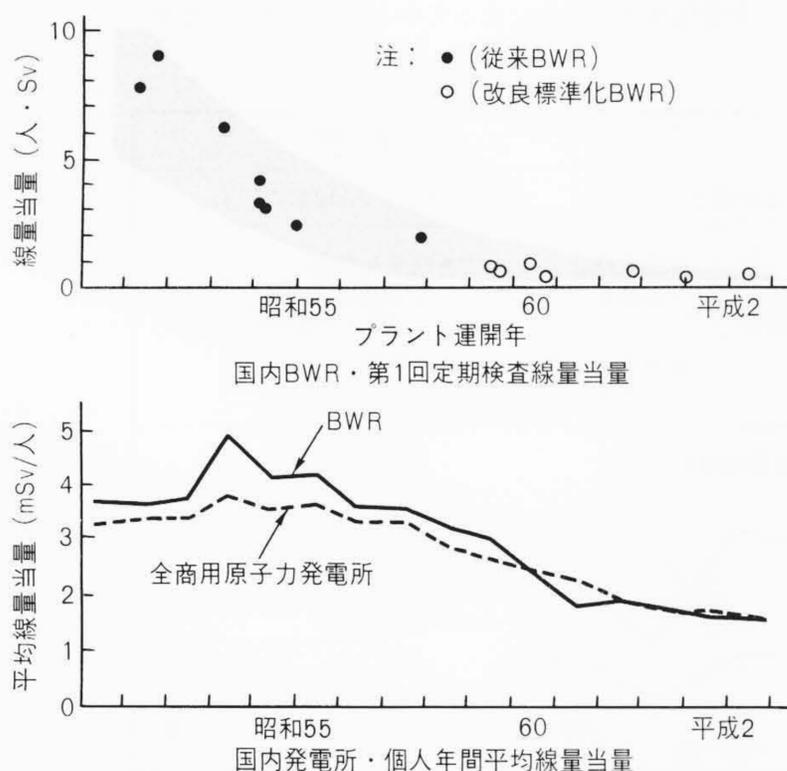


図4 設備利用率の向上 各種改善によって、発電量の増加の中で設備利用率が向上してきた。



注：略語説明 ICRP (国際放射線防護委員会)

図5 線量当量の低減 当期のBWRでは線量当量が比較的高いものがあったが、その後の改善によって年々低下させることができた。今後さらにICRP勧告に適応させていく。

に作業者が受ける線量当量が比較的高いものがあった。その後、線量当量を年々低下させることができ、最近のプラントでは第1回定期検査線量当量が200人・mSv(20人・rem)以下のレベルにまで下がっている(図5)。しかし、ICRP(国際放射線防護委員会)新勧告が出され、個人の年間線量の限度値が引き下げられる見通しなので、これからもよりいっそうの低線源量プラントを目指した技術開発を行う考えである。

(3) 廃棄物量の低減

原子力発電所から発生する放射性廃棄物の処理では、発生量低減および減容・安定固化処理を重点に種々の新技術開発・改善を行ってきた。BWRプラントの場合、昭和56年度から7年間で発電量当たりのドラム缶発生本数は

は約 $\frac{1}{6}$ に低減している(図6)。

3 信頼性の向上と予防保全

3.1 原子力プラント信頼性向上活動

(1) わが国の信頼性向上施策の経緯と成果

わが国では原子力発電所の増加に伴って、発電に占める原子力の役割の重要性と、安全に対する国民の要求が増大してきた。このような要求にこたえるため、国・電力会社・プラントメーカーがそれぞれの立場から協力し、信頼性向上のための活動を推進してきた。この結果、わが国での原子力発電所の不具合発生件数、計画外炉停止件数はともに大幅に減少して、世界のトップレベルに達している(図7)。これは、導入期のプラントでの運転

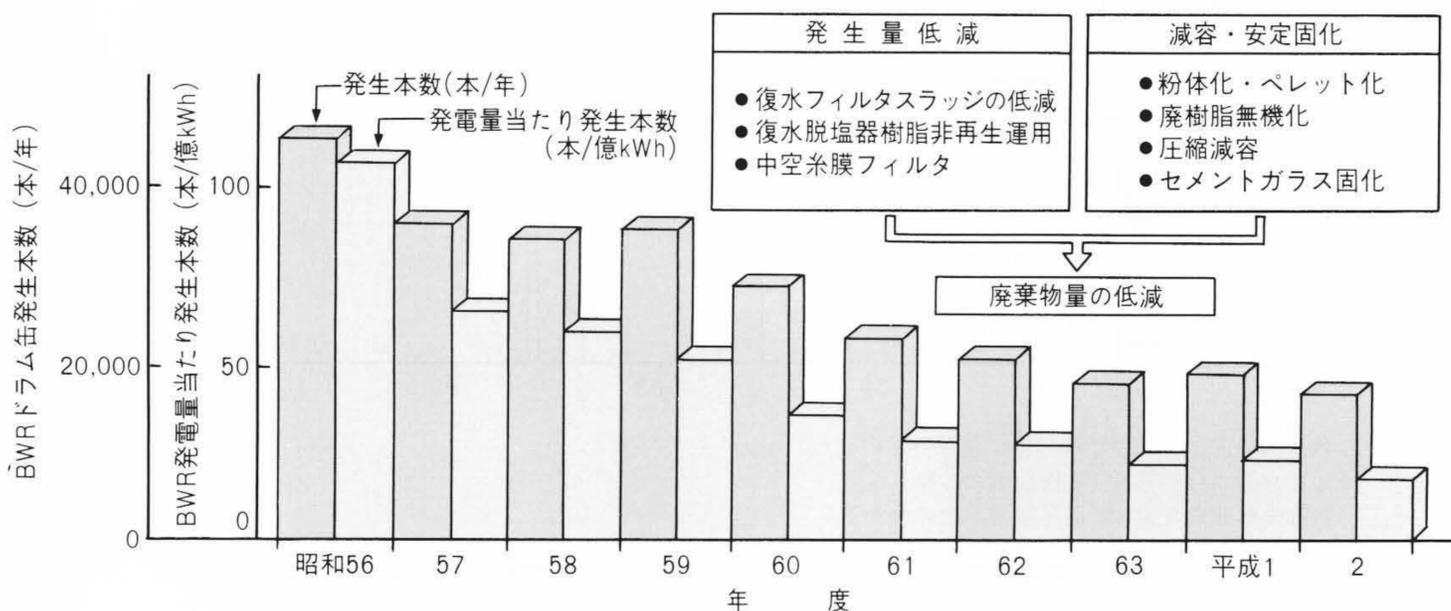


図6 廃棄物量の低減 廃棄物量は、発生量の低減と減容・安定化技術の開発によって年々減少させることができた。

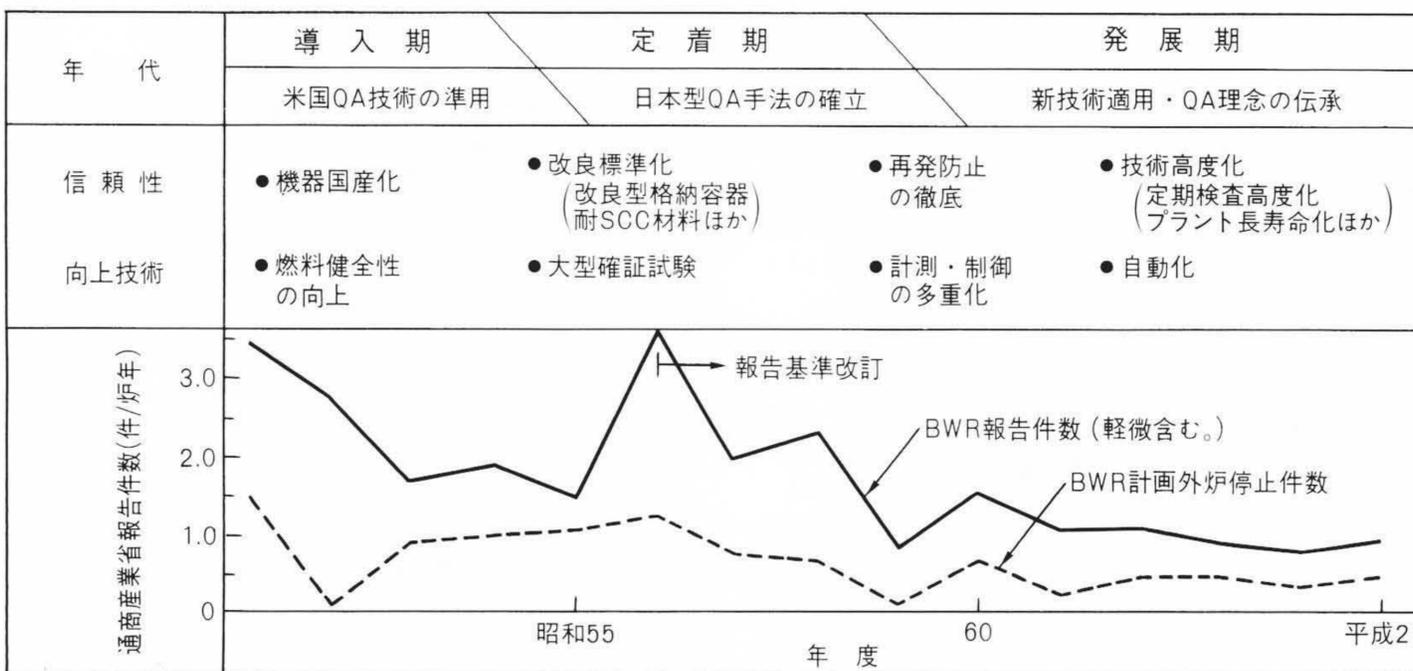


図7 わが国の信頼性向上施策の経緯と成果 各種信頼性向上活動を実施してきた結果、わが国での不具合発生件数が減少してきた。

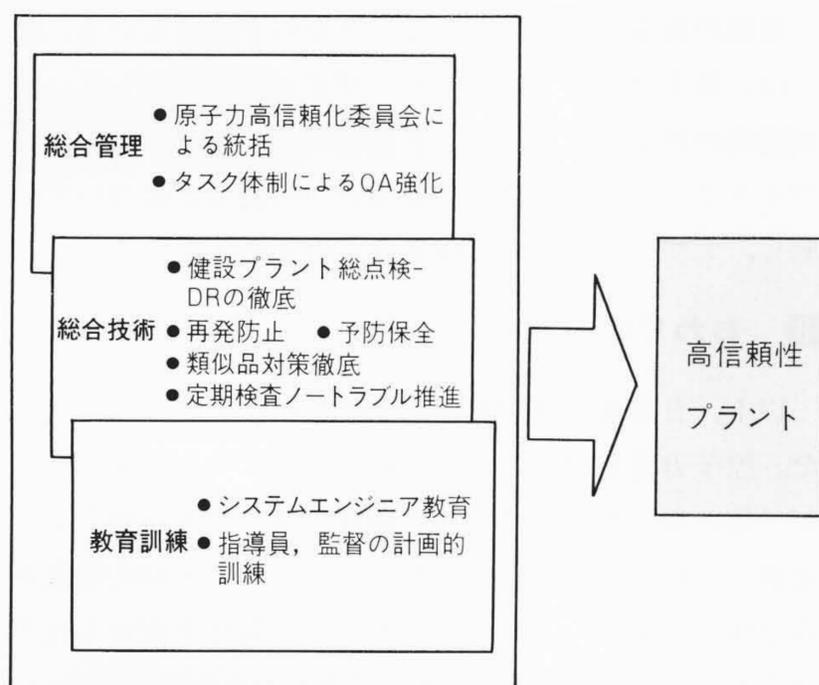
経験を分析・評価し、その原因を正確に理解し対策を行ったこと、すなわち国および関係機関による品質保証基準の策定、改良標準化の推進、電力会社とメーカーでの先行炉運転経験を踏まえた高信頼化技術の開発と実機への反映、品質保証体制の整備などが相まって達成した成果と考えられる。現在では、このような品質保証活動も日本型のQA(品質保証)手法の定着期を経て、今後QA手法のいっそうの発展期に入っている。

(2) 品質保証活動

日立製作所では管理、技術および教育の面からとらえた総合的な品質保証活動を行っている(図8)。管理面では原子力高信頼化委員会を設けて全社的に統括するとともに、個別にはタスク体制によって活動を強化している。技術面では、デザインレビューの徹底、再発防止の徹底、定期検査ノートラブル推進などを行っている。教育・訓練は、各層の技術者に対して、計画的かつ広範囲な教育・訓練を行っている。これら活動の基盤をなすものは、日立製作所で伝統的に行っている品質保証を重視した精神活動であり、さらに最新のお客様によりいっそう満足してもらえよう運動を加えて、さらなる高信頼性プラント造りに努めていく。

3.2 予防保全主要技術

信頼性向上のための予防保全活動は体系的に実施していく必要があり、新技術の反映、監視・点検・余寿命評価・補修などの技術開発、さらに設備管理、運転経験の



注：略語説明 QA(品質保証) DR(デザインレビュー)

図8 品質保証活動 管理・技術・教育の面から品質QA活動を行うことによって、高信頼性プラントを達成する。

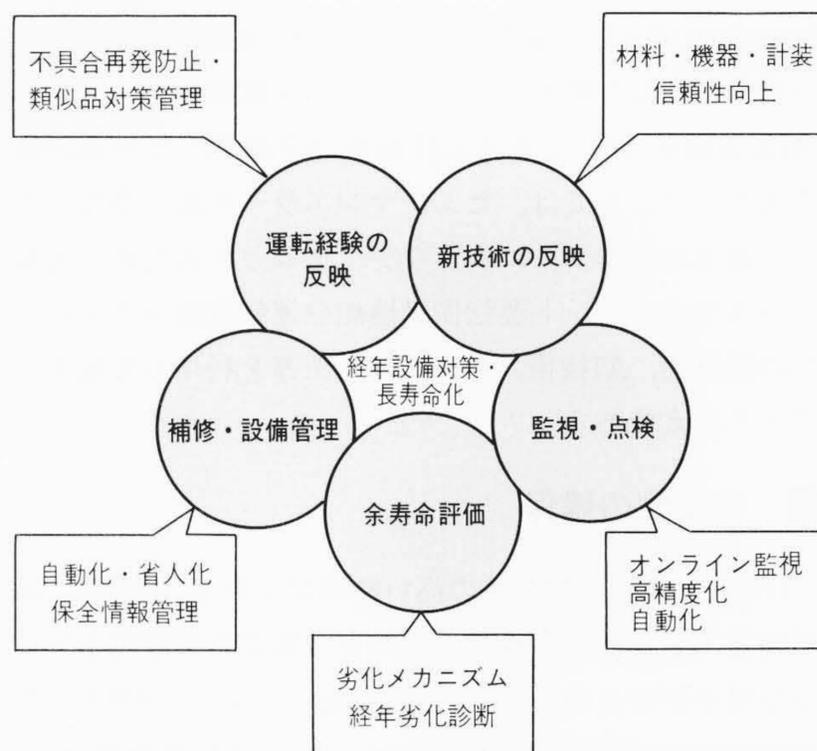


図9 予防保全の展開 予防保全活動を、体系的に広範囲にわたって技術展開している。

反映などを、プラント内各種機器(原子炉機器、ポンプなど)に対して広範囲に展開している(図9)。

3.3 保守サービスにおける課題と対応

最近の課題として労働人口の減少と高年齢化、運転プラントの増加と定期検査時期の集中化傾向、およびICRP新勧告に対応するための個人線量当量の低減があげられる。

これに対して、自動化・省人化のいっそうの推進、保守作業の定期検査期間外の実施などによる作業量の平準化、さらに労働環境や待遇の改善を図ることを主要な対応策と考えている。

4 運転監視制御システムの高度化

原子炉発電所に代表される大規模なプラントを健全かつ安全に運転維持するためには、十分に考慮された適切な運転監視制御システムが必要不可欠である。

運転監視制御システムの改良・開発にあたっては、安全かつ安定な運転の確保を第一とし、高いシステム信頼性を追求し、また、プラントの運転保守にかかわる人と機械との融和を図ることを目指している。原子力プラントの運転監視制御システムは、急速に進歩するエレクトロニクス技術を積極的に取り込み、絶え間ない改善、改良を図ってきた。その結果、最新の技術を総合し新型中央監視制御システムNUCamm-80(Nuclear Power Plant Control Complex with Advanced Man-Machine

Interface-80)を完成させ、さらに運転支援機能をよりいっそう拡大した新型の総合デジタル監視制御システムNUCAMM-90へと着実に技術開発を展開している。次のステップとしては、ヒューマンエラーを起こさないこと、あるいはエラーに寛容なシステムとするため、兆候ベースでのプラント運転保護機能や運転支援システムなどの開発を、AI技術、ニューロ技術等を利用して展開していく考えである。

5 安全性の確保

BWRは固有の安全性の高い軽水炉であり、さらに、深層防護の観点から多重の工学的安全施設を設けた十分安全な原子炉である。この安全性確証のために、BWRの開発当初から日立製作所独自にLOCA(冷却材喪失事故)時の基礎現象確認実験を実施し、電力会社の共同研究で大型装置を用いた総合実証試験を実施してきた。また、これらの知見に基づいて、新LOCA解析コード(SAFER)を開発し、LOCA時での大きな安全余裕を定量的に示してきた。これらの知見をベースとして、さらに安全なABWRの開発を進め、柏崎刈羽6・7号機に適用するに至っている。

一方、米国のTMI(スリーマイル島)事故、旧ソ連のチェルノブイリ事故を契機として、設計基準事故を超える過酷事故時に対する安全余裕確認のための研究開発を進めている。

軽水炉の安全性は、多重防護思想に基づいて決定論的に安全確保対策をとり万全を期しているが、確率論的安全評価の手法を活用し、アクシデントマネジメントなど安全設計の高度化、運転安全向上にかかわる支援システムの開発を進めている。また、自然循環による炉心冷却の簡素化や自然放熱型格納容器など、外部動を利用しない静的機器による安全性の追求により、安全性をわかりやすくするための新しい概念を開発していくことも今後の方向と考えている。

6 ABWRの建設

日立製作所はBWRの良好な運転実績と特徴を十分に生かし、これまでのBWRの技術を集大成させて安全性、経済性および運転性をよりいっそう高めたABWRの開発を、東京電力株式会社の指導のもとに、米国GE社、株式会社東芝と共同で進めてきた。原子力発電へのニーズが高まり、今後長期にわたって軽水炉が原子力発電の主

流を占めることが予想されるが、ABWRがこの期待にこたえられるものと確信している。ABWRは柏崎刈羽6・7号機に採用され、平成3年9月に6号機の、平成4年2月に7号機の着工と、世界最初の建設に向かって、三次元CADなどによる配管設計、あるいはコンストラクションCAEを活用した建設計画などを鋭意進めている。

7 21世紀へ向けた夢のある技術開発

7.1 軽水炉高度化への対応

軽水炉では、きたるべき21世紀の社会情勢、特に労働環境の向上に対する要求に応じるとともに、燃料サイクルを取り巻く状況に柔軟に対応できるように、「人に優しい」、「シンプル(わかりやすい)」、「インテリジェント」および「フレキシブル」を目指し、いっそうの高度化を図ったプラントを開発することが要望されている。このような要望にこたえるため、次世代型軽水炉としてABWR改良発展炉の開発を電力会社と共同で開始した。

これまでもポンプなどの動的な機器に代わって静的システムを用いたSBWR(単純化BWR)の共同開発に参画するとともに、大型格子炉心など独自の技術開発を行ってきたが、これらの研究で得た成果をさらに高度化し、ABWRの改良発展炉の開発に取り組んでいきたい。

7.2 立地の拡大

日立製作所は、新規プラント建設のためのサイト確保と立地対応の選択肢を広げ、地域や一般の人々にとって親しみやすく、プラント内での業務に従事する人々にとってより魅力的で、周辺環境と調和のとれた親しみやすい景観の発電所を目標としていきたいと考えている。例えば、将来プラントに対するデザインの試みとして、曲面構成の建屋によるプラント景観の向上、見学者用通路やインテリアの改善などによる人への優しさについて配慮し、デザインなどでも役立ちたいと考えている。

8 おわりに

以上、日立製作所のBWRに対する取組について述べた。原子力発電は国、電力会社およびプラントメーカーが一体となった努力によって優れたエネルギー源として定着し、わが国経済の発展を支えてきた。長期的観点から今後も安定したエネルギー源として期待を寄せられているが、国や電力会社の指導のもとに、より使いやすい、より信頼性・経済性に優れた原子力発電を目指し、総力を結集して取り組んでいく考えである。