

ABWR(改良型沸騰水型原子炉)改良技術の実用化への展開

Recent Development of Advanced BWR Technology for Plant Application

ABWRは、昭和60年に開発を完了した。通商産業省第三次軽水炉改良標準化プラントとしての認定を経て、実プロジェクトの詳細設計段階に移行し、プラントに適用する改良技術も着実に確証・実証され実用化している。

ABWRは、単純化、高性能化、コンパクト化によって、プラント総合特性としての運転性・安全性・経済性をよりいっそう高めたものである。特にインターナルポンプは、原子炉系統の単純化、コンパクト化を促進するほか、改良型制御棒駆動システムとあいまって、プラントの運転性・安全性の向上をもたらした。また建屋一体型鉄筋コンクリート製格納容器は、コンパクトな構造と仮想的な事故にも十分耐えられる堅固な特性を持ち、経済性・安全性の向上に寄与している。

これらキーとなる改良技術は、実用化のための試験も完了し、所期の目的が高水準の特性をもって実現することが示され、実プラントの建設に向けての着実な歩みとなっている。

堀内 哲男* *Tetsuo Horiuchi*
桜井三紀夫* *Mikio Sakurai*
仲平 四郎** *Shirō Nakadaira*
間瀬 矩章* *Noriaki Mase*
小山田 修* *Osamu Oyamada*

1 緒 言

日立製作所は、東京電力株式会社をはじめBWR(沸騰水型原子炉)ユーザー電力会社の指導・支援の下に、米国GE(ゼネラルエレクトリック)社、株式会社東芝との国際共同研究により、軽水炉の理想像を追求したABWRの開発に成功した¹⁾。プラントイメージを図1に示すが、安全性、運転性、建設性のほか、プラント熱効率も向上し、経済性とあいまった特徴によって、国内外の原子力プラント建設の促進に大きい期待がかけられている。

これら優れた特性を生み出す改良技術の実用化は、実プラントの詳細設計・建設に向け着実に進展している。

原子炉水の循環は、従来の大型ポンプによる外部ループ方式から小型のポンプ内蔵方式(インターナルポンプ)に変更し、プラント出力変動に対する追従性、保守性、安全性を向上させている。インターナルポンプは、社内試験、国の確証試験を経てその性能は十分確認されており、今後の実証試験により国産ポンプの優秀性、プラントパフォーマンスの信頼性は確実に示される。

原子炉の制御は、電動・水圧両用制御棒駆動方式を採用することで微駆動も可能となり、出力応答性、燃料信頼性の向上をもたらしている。装置は米国の実プラントで実証試験を実施している。

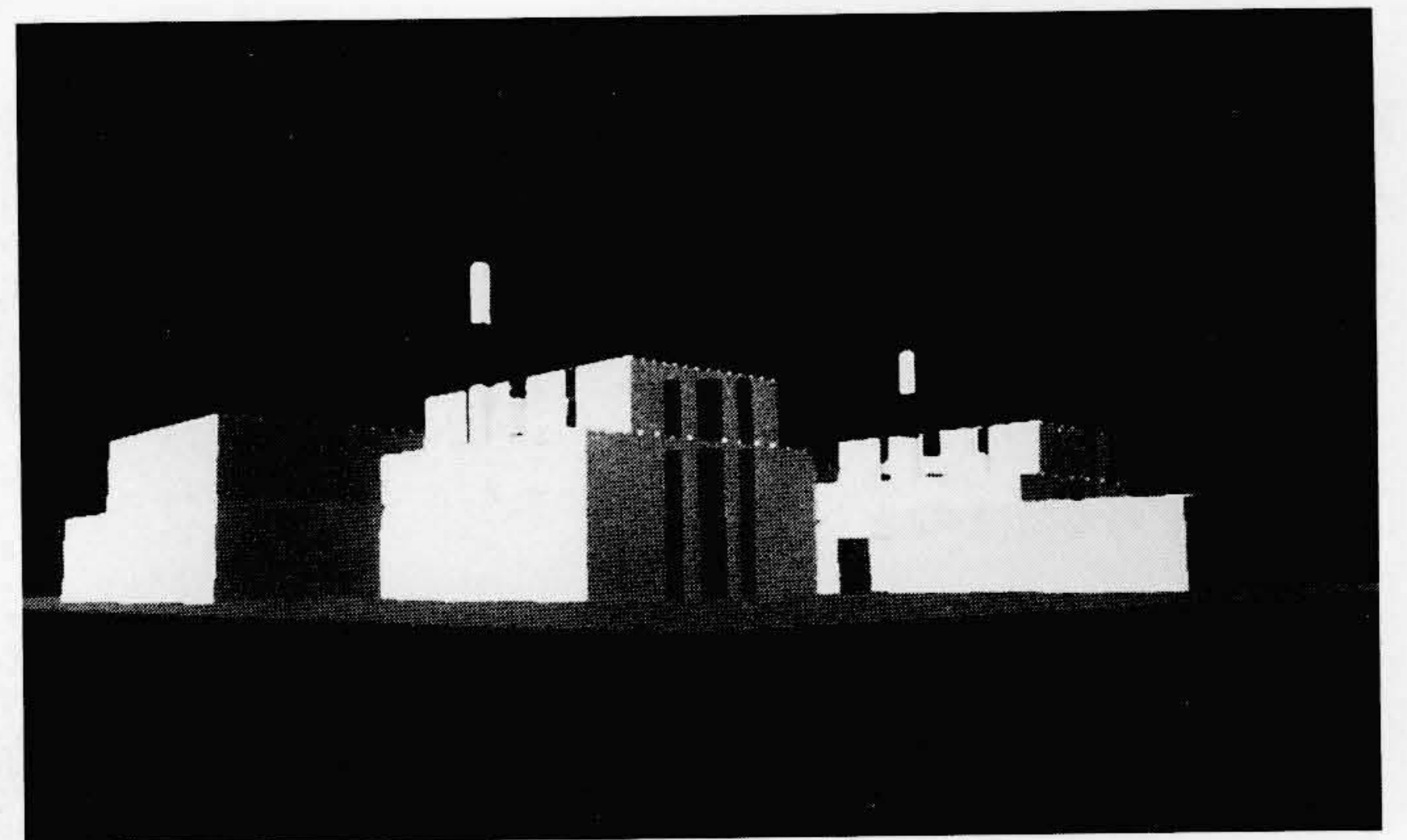


図1 ABWRプラントのイメージ ABWRツインプラントのイメージを示す。軽水炉の理想像を追求したABWRに適用される改良技術の実用化は本格的なプロジェクト展開に向けて着実に進展している。

鋼製に替え鉄筋コンクリート製建屋一体型構造とした原子炉格納容器は、万一の事故を仮定しても耐えられる堅固なもので、かつ原子炉建屋のコンパクト化をもたらす画期的構造であるが、その実証試験も終了し、今後は設計基準の確立、実設計推進・建設具体化に進む。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所土浦工場

2 日立型インターナルポンプシステムの実用化

インターナルポンプシステムは昭和61年度までに開発及び確証試験を完了²⁾し、各機器が所要の機能を発揮し、プラント総合特性向上に寄与するため実プラントへの適用設計を推進中である。

インターナルポンプシステムは従来の外部ループ型再循環システムに替わり、炉内で冷却材を強制循環させて炉心を冷却し、効率的に蒸気を発生させる機能を果たすものである。

本ポンプの回転数を制御して、炉心流量を調整することにより原子炉出力を安定に制御するとともに、プラントの負荷追従運転に迅速に対応することが可能である。また、炉心流量の増減により炉心内ボイド率を変化させ、中性子スペクトルを変えてプルトニウム蓄積・燃焼を行って燃焼効率を高める運転も可能であり、炉心流量制御範囲を広めることでより高い経済性を得ることができる。

2.1 インターナルポンプの高信頼化技術

インターナルポンプは、原子炉圧力容器に内蔵される唯一の回転機械であることから、長期運転に対する安全性、信頼性確保が重要となる。そのためにはポンプのインペラ、ディフューザの水力部、水中軸受や逆転防止装置の機械要素、ポンプ材料、電動機巻線、シール端子などポンプの各構成要素ごとにその機能を確認し、その使用限界特性を把握しておくことが肝要である。

(1) スラスト及びラジアル軸受の特性

ポンプの信頼性、耐久性は軸受部の特性で決まるといっても過言ではない。

図2はスラスト軸受の耐負荷荷重特性を示すものである。回転数約 $1,500 \text{ min}^{-1} \{\text{rpm}\}$ で負荷荷重は2～3 t以下であるがこの5倍に当たる10 tの負荷に対しても十分に耐えられることを確認した。これはスラストパッドの支持機構を図3のようにピボット方式にして3次元的な挙動を可能にし、かつ板ばね機構を設け数枚のパッドで均等に荷重を分布できるように工夫していることなどによる。

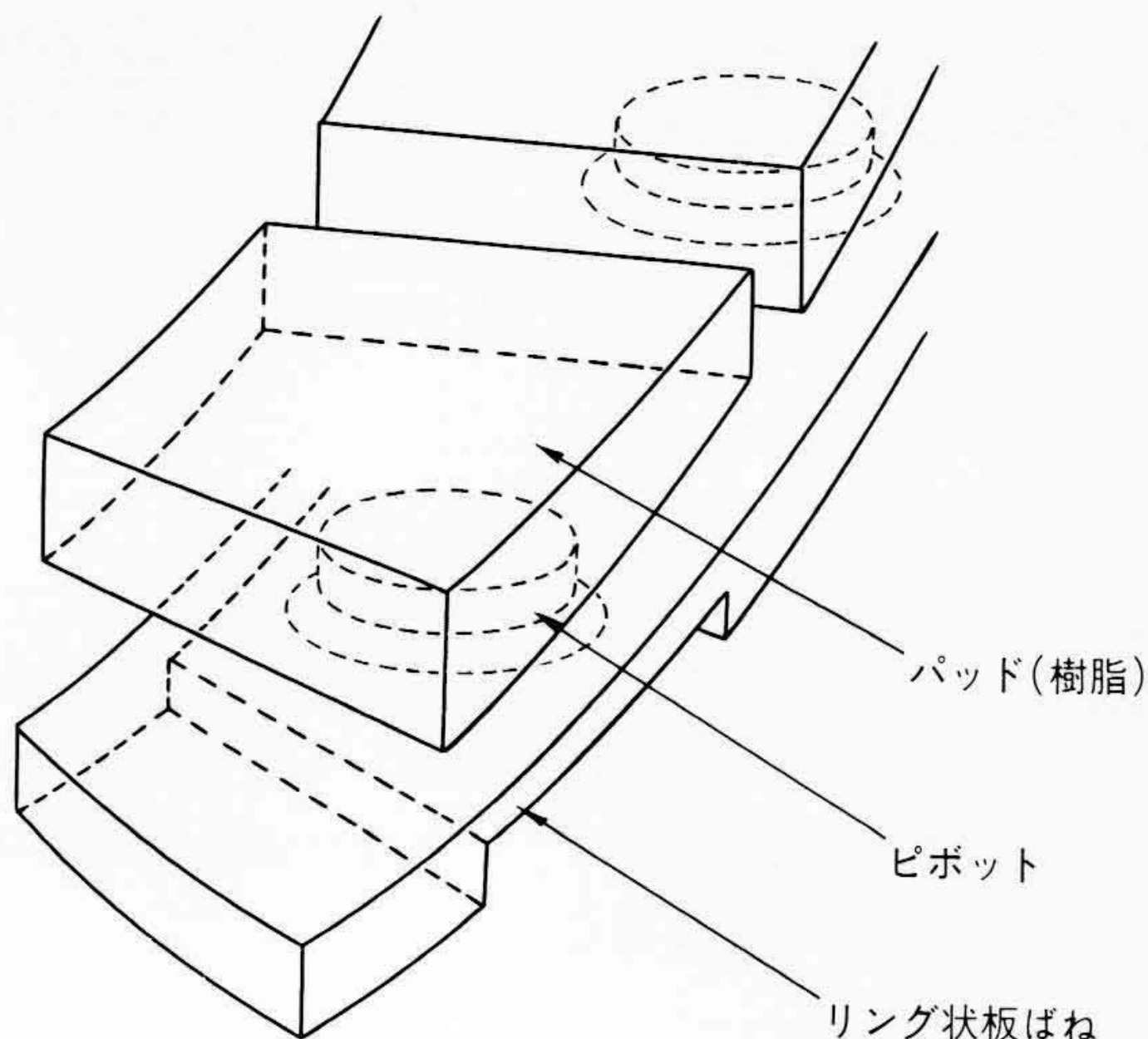
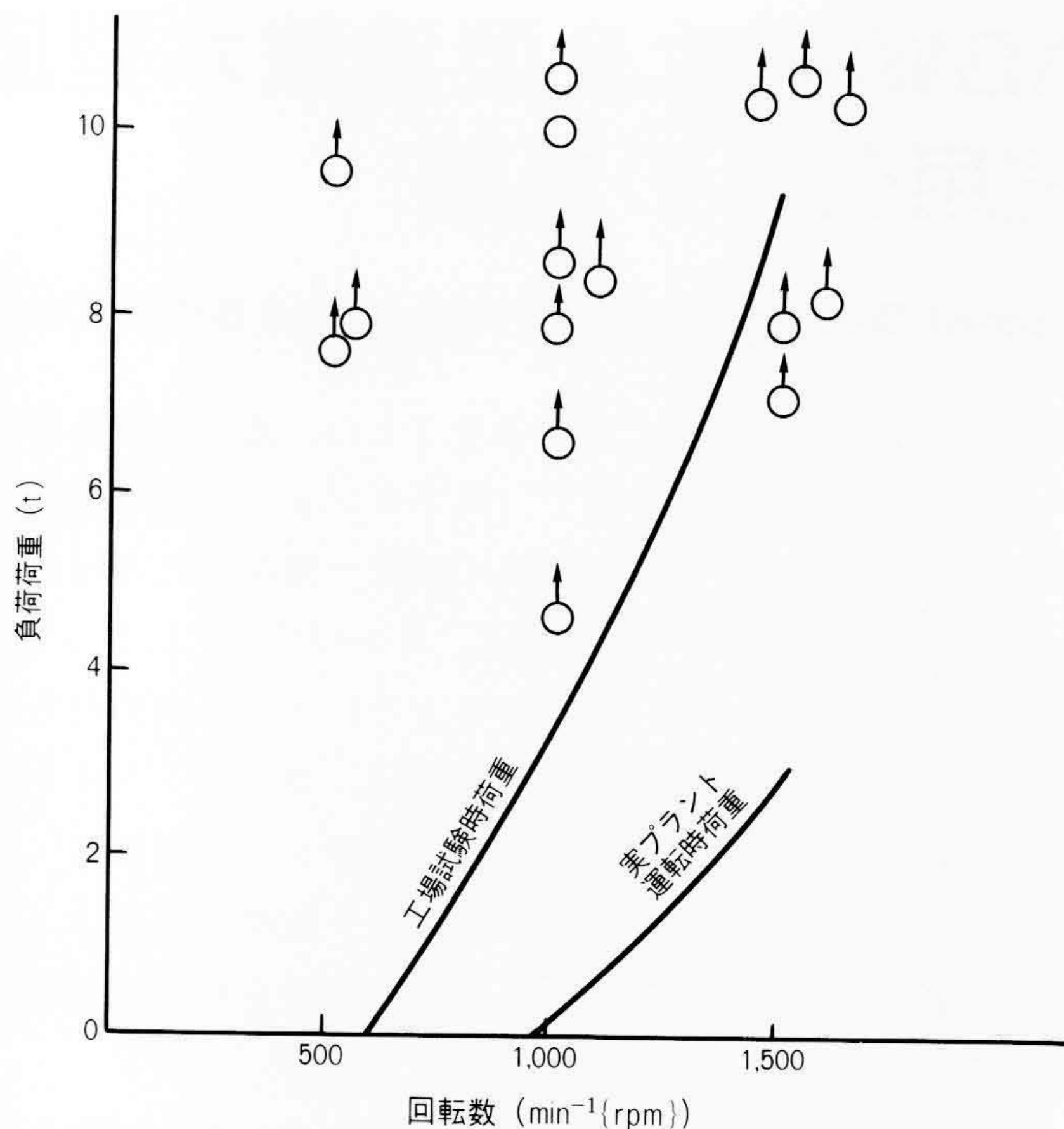


図3 スラスト軸受構造 高荷重に対しても水潤滑膜が形成されやすいように、パッド支持部を球形、ピボットとし、ピボット取付位置はパッド中心位置より偏心させている。またリング状板ばねによりパッド全数に均等な荷重が作用するように工夫されている。

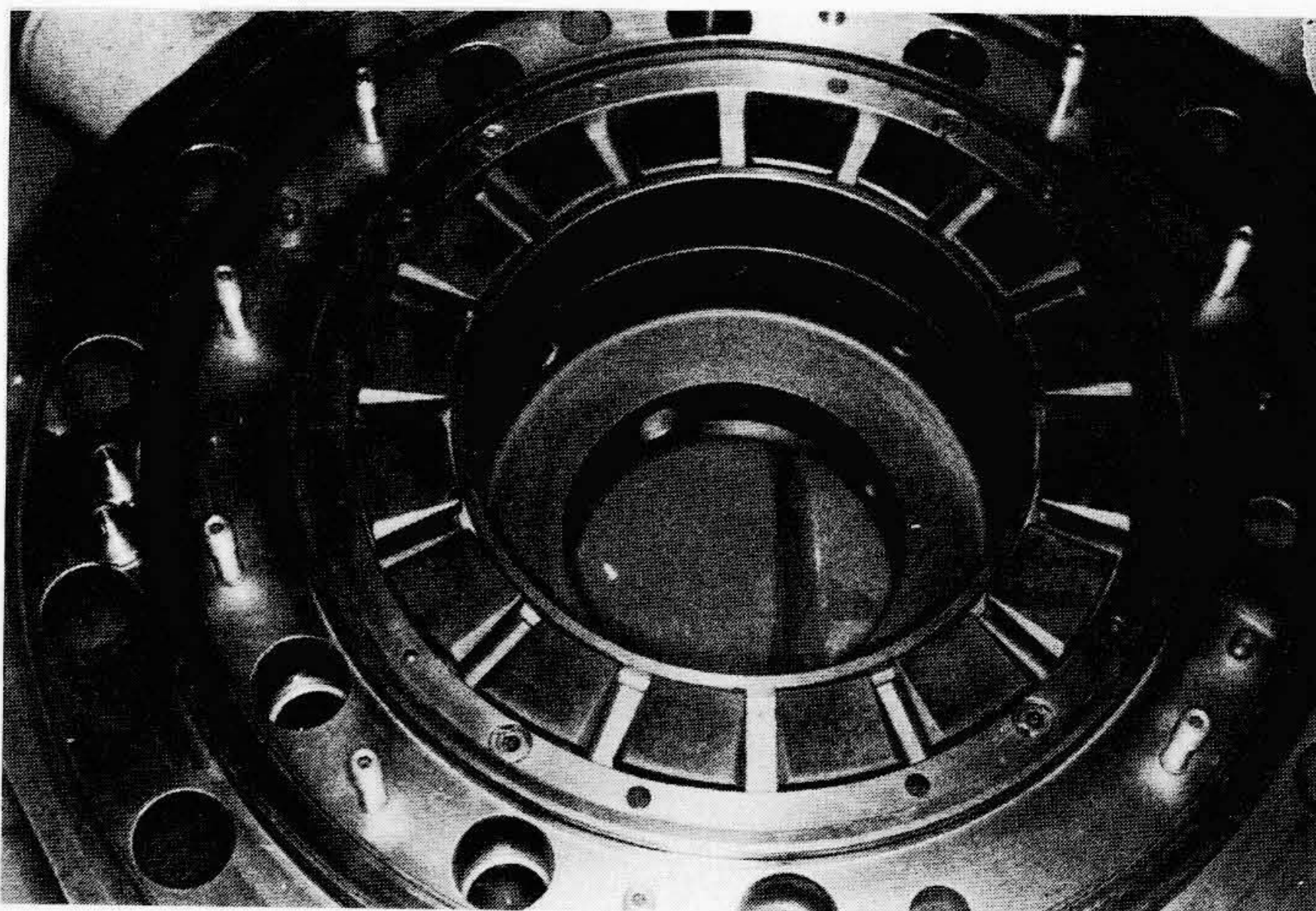


注：記号説明

○ (○印点は確認値で、↑印は耐荷重点は、それ以上であることを示す。)
— (負荷荷重の予想値を示す。)

図2 スラスト軸受耐負荷荷重特性 スラスト軸受周りの実規模大の試験装置で、実プラント運転時は2～3 tのスラスト荷重であるが、10 t負荷しても良好であることを確認した。

また図4はラジアル軸受の制振特性を示したものである。軸受形状によっては $\frac{1}{2}$ 回転周期でふれまわり現象が発生する。この現象はポンプ回転部が軸受ギャップいっぱいふれまわり軸受摩耗をもたらすため、実プラントで使用する運転回転数に対してもこれが発生しないように工夫する必要がある。日立式ポンプでは非対称溝付き4円弧軸受を採用し、運転回転数($\sim 1,500 \text{ min}^{-1} \{\text{rpm}\}$)に対し、ふれまわり現象の生じない信頼性、耐久性の十分高い構造としている。



(2) 逆転防止装置

逆転防止装置は停止したポンプがほかの運転中ポンプの吐出し流により逆転するのを防止するためであり、ポンプの損傷を防止するとともに逆流流量を低減させる役割を担っている。これは、10台のポンプのうち何台かのポンプが停止してもプラントの出力運転が安定に維持できるよう配慮したもの

である。この装置は通常運転下で回転部としてのカムが浮き上がって固定部と非接触状態にあることが重要であるが、日立式ポンプでは、図5のカムの浮上特性に示すように、プラント運転中の連続最低回転数(約450 $\text{min}^{-1}\{\text{rpm}\}$)以下でも完全に浮き上がって、通常運転でカムが損傷を受けない機構であることを確認している。

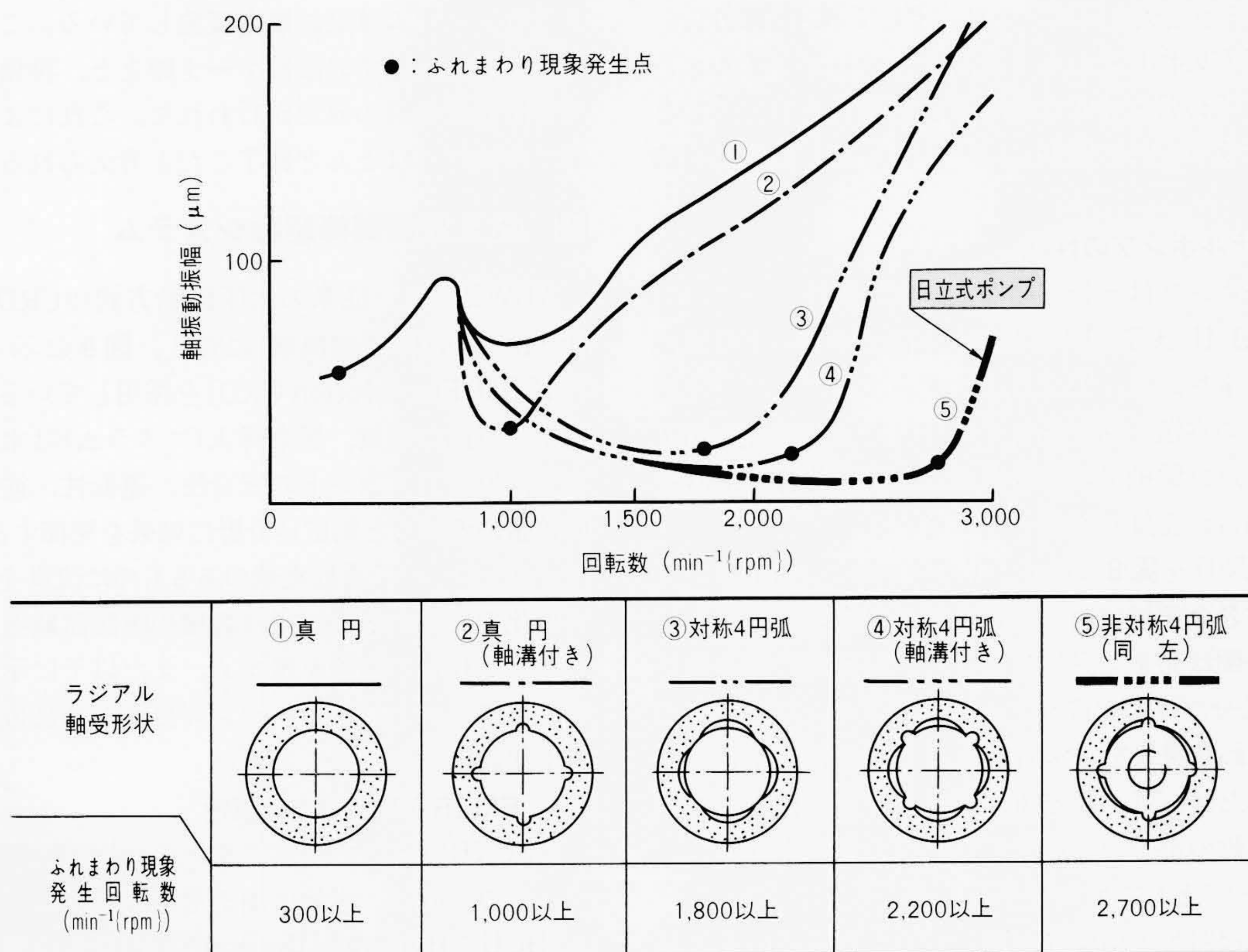


図4 ラジアル軸受形状による振動安定性特性 ラジアル軸受の形状によるふれまわり発生回転数を確認し、部品数が最小で最も安定な非対称4円弧を採用している。

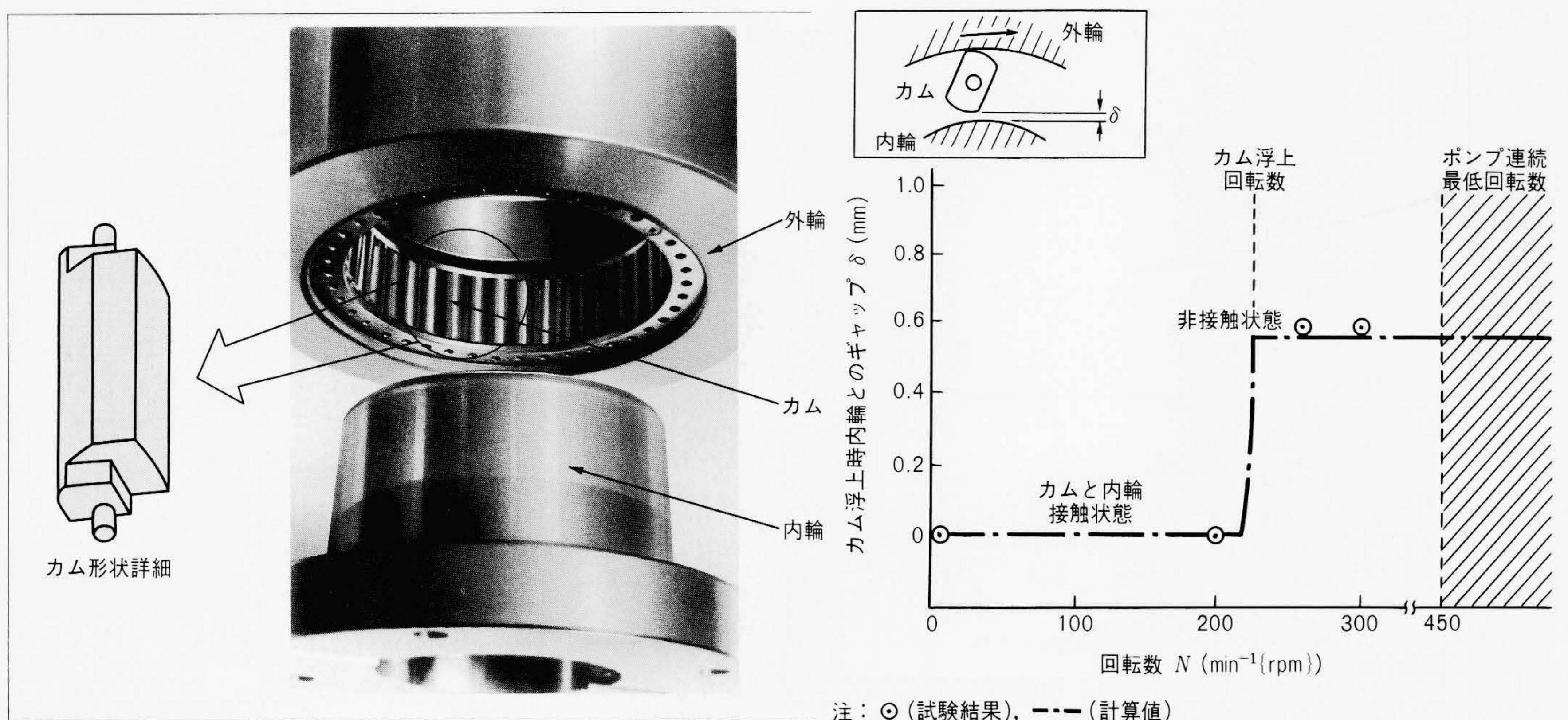


図5 逆転防止装置カム浮上特性 逆転防止装置は、カムの回転中心と重量中心の相対位置を工夫することによって、カムは正転中、完全に内輪(固定部)と非接触状態になりカムの損傷防止が図られている。

(3) 電動機の信頼性

電動機の信頼性、耐久性は使用雰囲気条件下での性能で決まる。

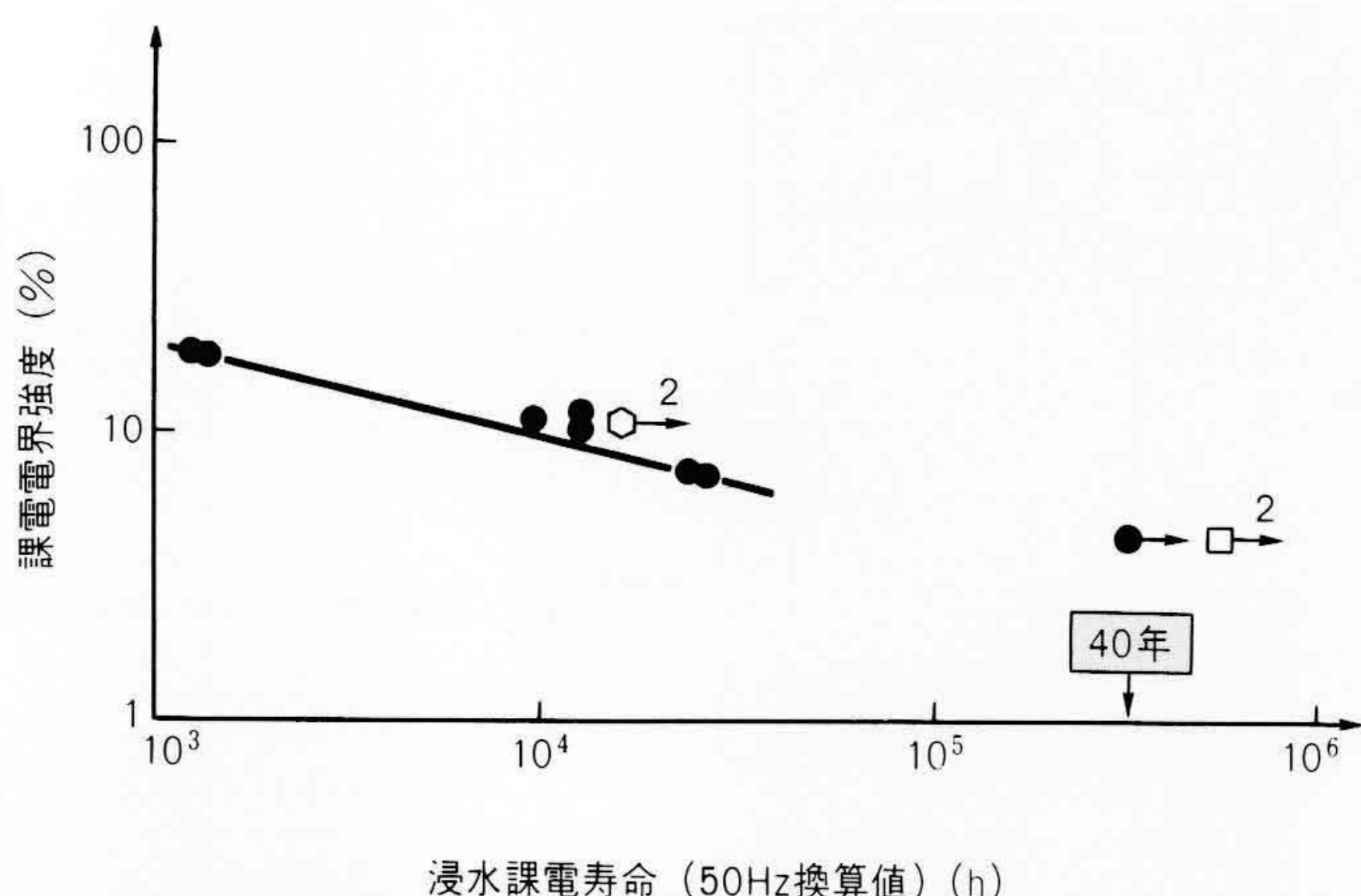
図6は電動機巻線について設計圧力の水圧サイクルや γ 線を照射させて浸水課電寿命特性を評価したもので、それが40年相当以上であることを確認している。

その他の構成要素についても同じような信頼性、耐久性確認を実施しており、それらを反映させて実規模大の日立式インターナルポンプ国産機を完成させた。そしてポンプ以外に、電源、制御装置を製作しそれらと組合せ、インターナルポンプシステムとして必要・十分な性能及び信頼性を有することを確認し、実プラントへの採用に向け万全を期した態勢を整えている。

2.2 インターナルポンプの性能

インターナルポンプはその機能から、水力特性としては効率が高いこと、Q-H(流量-揚程)曲線が変曲点のない下降特性であることが要求される。日立式インターナルポンプの実機運転条件と同一の高温・高圧条件でのポンプ水力特性を図7に示す。ポンプ及び電動機の総合効率は、要求仕様(65%)を上回る効率が得られ良好な性能となっている。

ポンプの振動特性を図8に示す。1,650 min⁻¹{rpm}まで実施した性能試験の全領域に対して軸受部の軸振幅は安定しており、回転体挙動は非常に良好であった。軸振動の周波数特性は回転数 N 成分だけが主成分であり、縦型ポンプに現れやすい軸のふれまわり現象を示す回転数 $N/2$ 成分は完全に抑制されている。したがって、回転体、軸受及び電動機上下端の巻線曲部など振動の影響を受けやすい部位の挙動が安定し、インターナルポンプとして耐久性を向上することにつながり、長期間連続運転に対して信頼性が高いものとなっていると評価できる。



注：課電電界強度100%は初期破壊電界強度

● (水中での耐絶縁劣化特性の測定値)

○ [水圧サイクル(0~9.8 MPa(0~100 kg/cm²))による試験]

□ (10⁸ラド照射後の試験)

添字は供試体の員数、→は健全状態で課電継続中のもの

図6 電動機巻線の浸水課電寿命特性 電動機巻線の絶縁材は、特殊架橋ポリエチレン電線を採用することによって温度、圧力、 γ 線環境下など、最も厳しい諸条件下で十分長時間(40年以上)の寿命があることを確認している。

また、燃料の経済性を向上するのに必要な炉心流量域拡大運転のための回転数増加についても、機械振動の点では健全性が維持できることが確認できている。この広い炉心流量域制御性能により、燃料の経済性を約20%向上することが可能となる。

2.3 インターナルポンプの信頼性実証試験

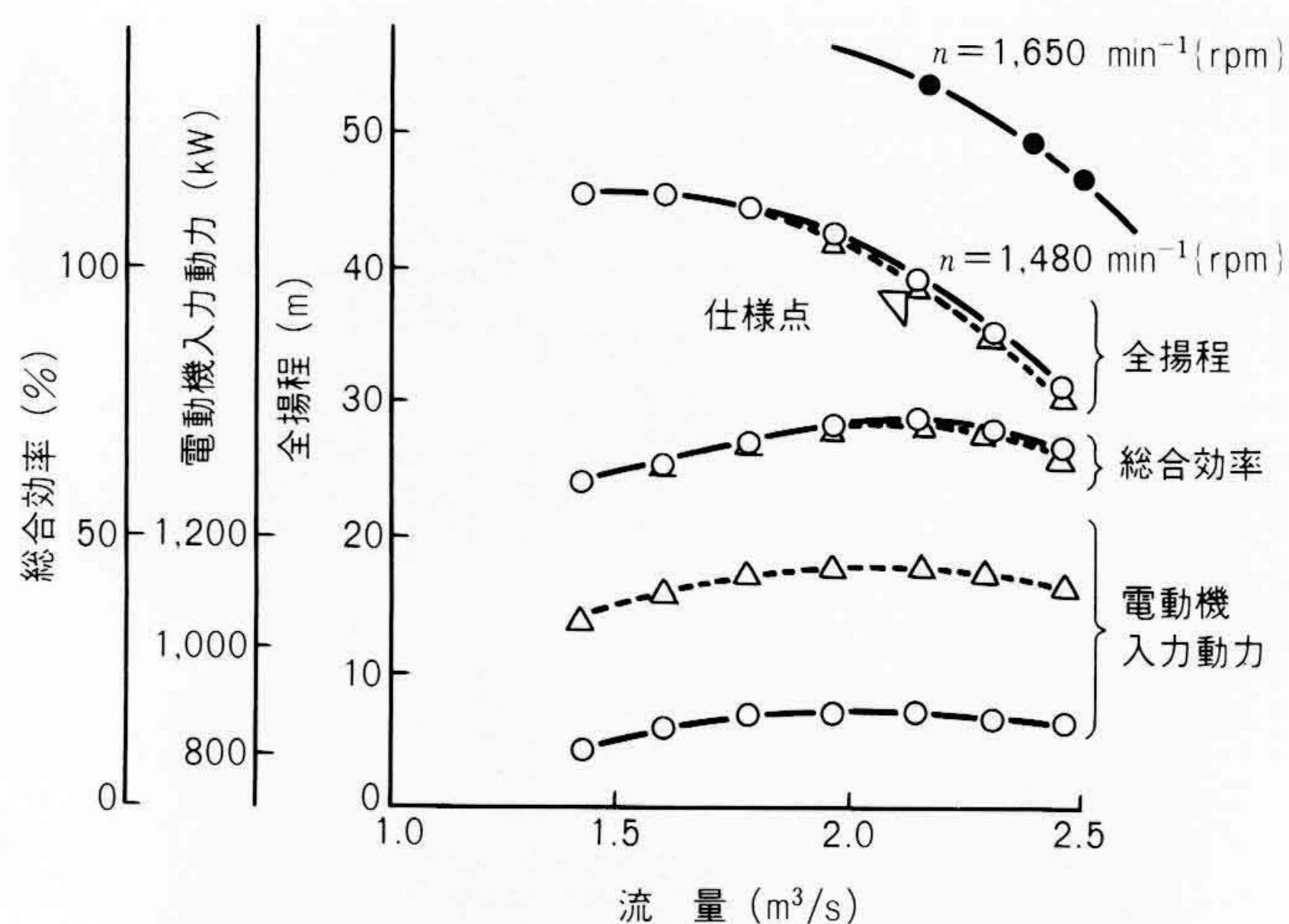
インターナルポンプについては、以上のような日立製作所内の開発試験に加え、電力共通研究及び原子力工学試験センタでのシステム確認試験も実施している。これらの試験により実用化に向けての設計データ確立と、再循環機器及び周辺機器健全性維持の確認が行われた。これにより、実用化に向けての検討はほとんど終了したと考えられる。

3 改良型制御棒駆動システム

ABWRでは、従来の水圧駆動方式のCRD(Control Rod Drive：制御棒駆動機構)に替え、図9に示す微駆動可能なFMCRD(Fine Motion CRD)を採用している。FMCRDは、通常の駆動は電動、緊急挿入(スクラム)は水圧で行う方式であり、原子力プラントの安全性、運転性、従事者が受ける放射線量の低減など幅広い分野に効果を発揮する。このFMCRDは、ヨーロッパで運転実績のあるものに改良を加え、国産化、実用化のための試験のほか各種の実証試験を完了したものである。それらの結果を踏まえ、また以下に示す設備の優れた特性をプラントパフォーマンスに全面的に生かすため詳細な実用化設計を実施中である。

3.1 FMCRDの性能・信頼性

FMCRDの仕様を従来プラントと比較したものを表1に示す。この装置は、本体に加えその駆動ユニットであるシステム(HCU：Hydraulic Control Unit)などの周辺機器の試作も含め、40年相当の寿命試験、地震時制御棒挿入性試験及び各



注：常温 --△-- (1,480 min⁻¹{rpm})

高温 --○-- (1,480 min⁻¹{rpm})

高温 --●-- (1,650 min⁻¹{rpm})

図7 ポンプ水力特性 流量・全揚程曲線は、変曲点のない右下がりの下降特性で、要求仕様点で71%以上の高い総合効率を得ている。

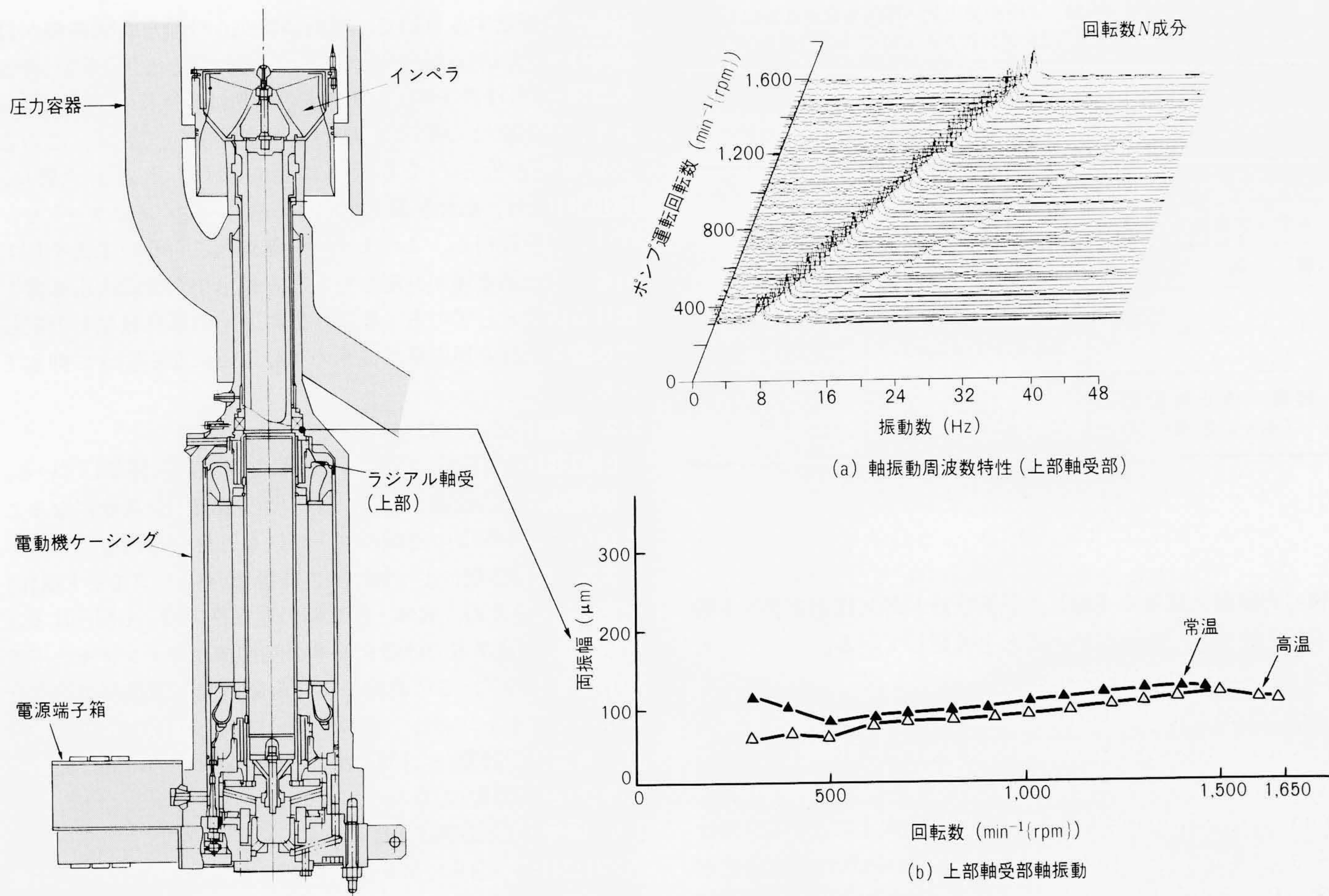


図8 インターナルポンプの振動特性 実規模大のインターナルポンプの回転部の振動は、上部軸受部で約100 μm で、ギャップに対して十分小さく良好な結果を得ている。また、周波数特性は回転数N成分だけが主成分であり、ふれまわり現象(N/2成分)は完全に抑えられている。

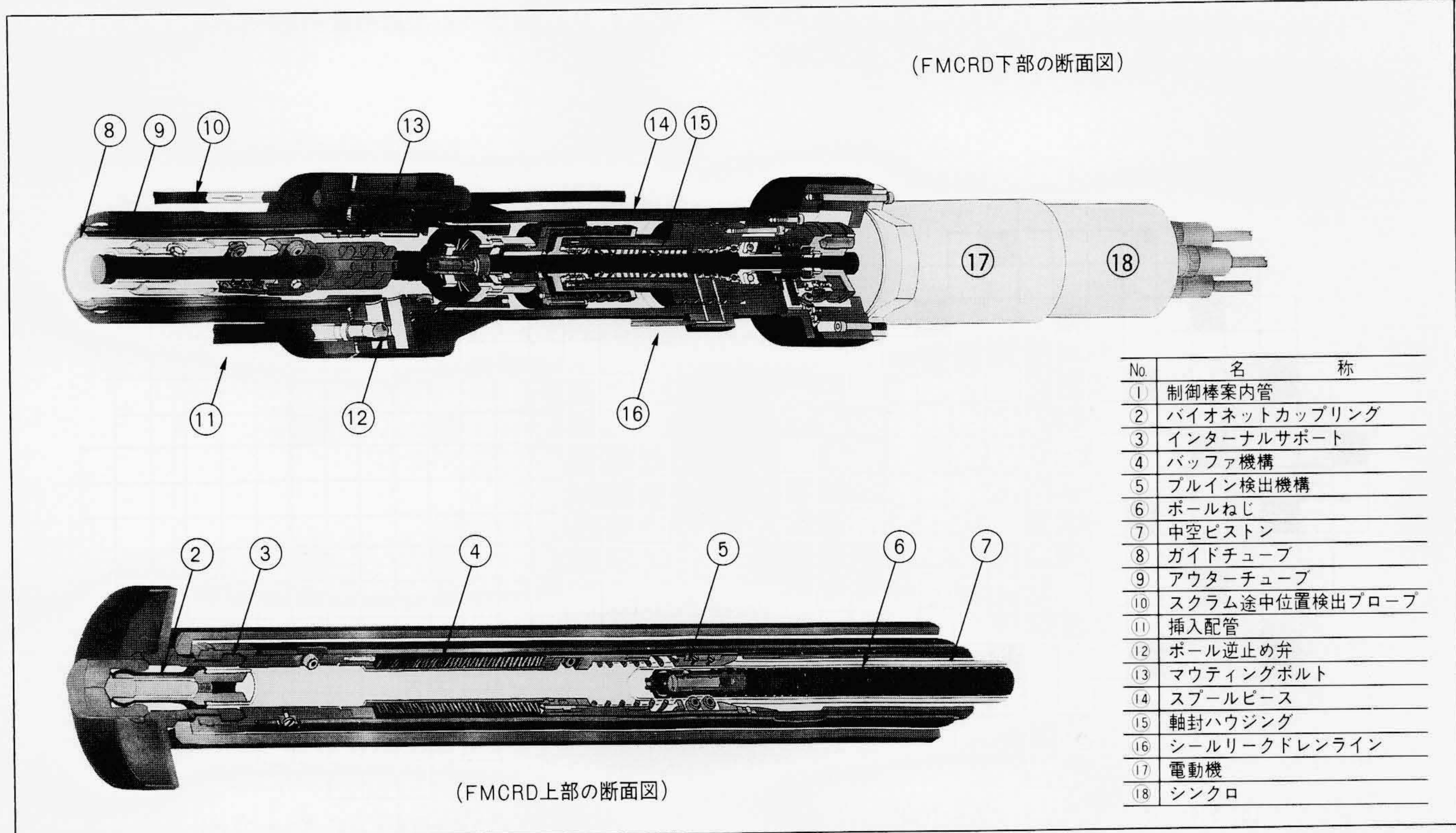


図9 FMCRD(改良型制御棒駆動機構) FMCRDは水圧・電動の両駆動源を持っており、制御性能が向上したほか制御棒との接合部をバイオネット方式にし、外れることのないように万全の構造としている。

表1 FMCRDの主要仕様 従来型と比べ駆動方式が多様化していること、ステップ当たり駆動幅が細分化されているのが特徴である。

項 目	FMCRD (改良型制御装置)	従来型制御装置
駆 動 方 式	電動型と水圧型の両用	水圧式
ステップ当たりの駆動幅	約18 mm	約160 mm
駆 動 速 度	約30 mm/s	約76 mm/s
ス ク ラ ム 時 間	約1.4 s/60%挿入 約2.8 s/100%挿入	約1.6 s/75%挿入
起動・停止時群操作 (ギャング モード)	最大26本	1本

種の過酷耐久試験を実施し、その性能と耐久性がプラント要求仕様を十分満たしていることを確認している。

3.2 安全性・信頼性の向上

FMCRDは、従来型CRDの駆動源(水圧だけ)に比べ、電動による駆動能力を追加し制御棒の挿入駆動源を多様化している。また、ステップモータの採用により制御棒の微動駆動(18 mm/ステップ)が可能となり燃料の信頼性向上により良い効果を与えている。制御棒の引抜き操作に伴い燃料の出力密度が変わり、その変化幅に応じた応力が燃料に発生するが、制御棒を微動駆動することで変化幅が低減するので、燃料に生じる応力は軽減する。これにより、燃料自身の性能向上とあいまって原子炉の運転裕度は大きく向上している。更に、FMCRDの採用は原子炉の反応度投入事象の発生防止・抑制にも効果がある。反応度投入事象とは原子炉施設の

安全性を評価する目的で、駆動装置から分離した制御棒が自然落下する事象を仮定したものである。もともとBWR(沸騰水型原子炉)は原子炉内のボイドの効果により負の反応度が加わり、反応度投入事象を抑制する特性を持っており、このような事象を仮定しても大事に至らない。その上で更に、FMCRDでは、駆動装置と制御棒の結合部にバイオネットカップリングを採用し、このような分離が起こらない工夫をしている。また制御棒が分離したことを検出する分離検出装置を設ける構造としている。更に、仮に万一の事象発生を仮定しても投入される反応度は従来の半分以下になるように抑えている。

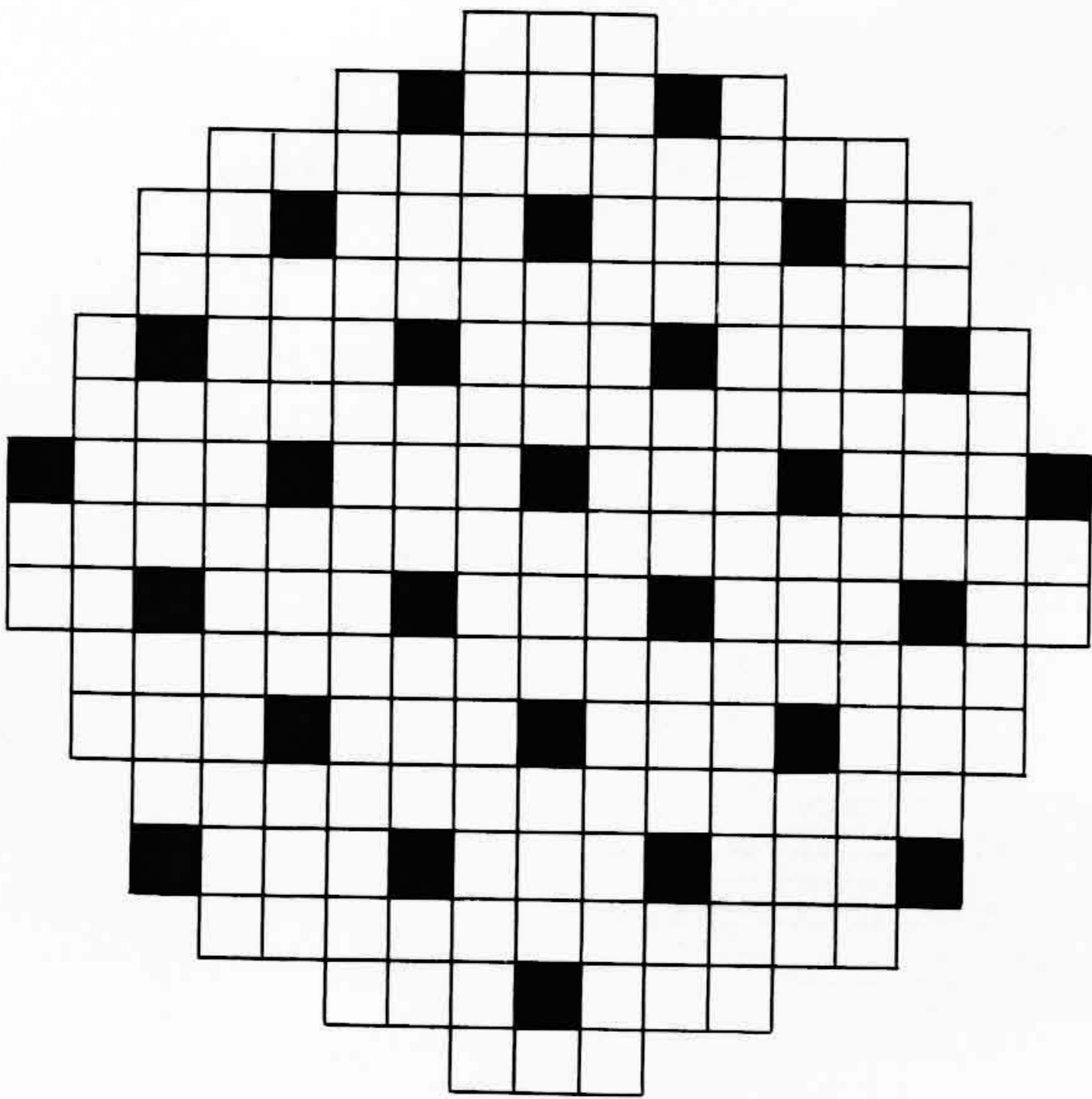
3.3 運転性向上への寄与

FMCRDの採用は、原子炉の運転性向上にも寄与している。制御棒の微動駆動により、反応度の微調整が可能になることから、より幅広い運転のニーズにもこたえられる。

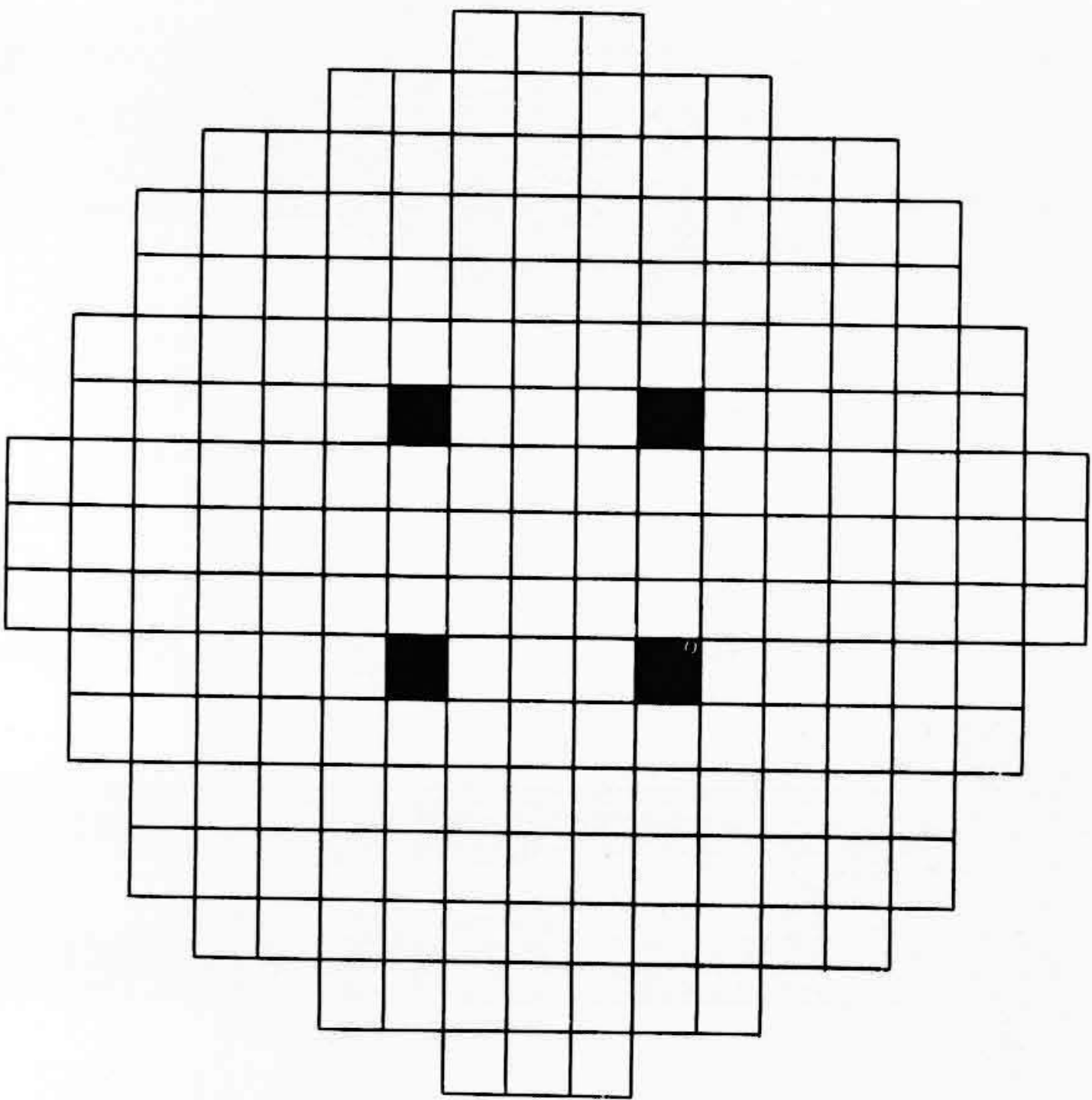
また、電動駆動により制御棒の群操作(ギャングモード操作)が容易になるため、起動・停止時の運転性は著しく向上する。すなわち、ABWRでは最大26本の制御棒がギャングモードで操作できるので、この操作により起動時間の短縮が可能となっている。ギャングモードのグループ例を図10に示す。例えば、高温待機状態から100%出力に達するまでの時間は従来の約半分(約5時間)となる。

3.4 保守・点検性の向上

FMCRDは、図9に示す電動機以下の部分に取りはずし可能な分割型構造となっているので、炉内に設置されている部分を取り出すことなく必要な保守・点検が可能になっている。これに加え、従来型CRDに比べ炉圧スクラム機能及びスクラム排出系がなくなっているため、これらの保守・点検は不要であり保守時に受ける放射線量の低減にも効果がある。



(a) 起動・停止時ギャング グループ(例)



(b) 出力運転時ギャング グループ(例)

図10 ギャング グループの例 起動(停止)時には、(a)の例のように炉心全体に一樣に分布した最大26本の制御棒群操作で引抜き(挿入)を行う。出力運転時には、(b)の例のように対称位置の少数本群操作により引抜き(挿入)を行う。

4 建屋一体型鉄筋コンクリート製原子炉格納容器

軽水炉では原子炉の万一の事故を仮想して、外部に放射能を漏らさないための堅固で、かつ性能の良い原子炉格納容器を設けている。

BWRでは、従来から事故時の雰囲気能耐放射能を十分に格納するために、圧力抑制方式の格納容器を採用している。

ABWRでは、この圧力抑制機能のほか機器・配管類の配置、経済性・建設施工性などについて総合的な評価を行った結果、安全性、経済性の両立する原子炉建屋一体型の鉄筋コンクリート製原子炉格納容器(以下、RCCV: Reinforced Concrete Containment Vesselと略す。)を採用している^{3),4)}。

またRCCVでは、圧力抑制用ベントシステムを従来の垂直ベント方式に替えて、水平ベント方式とし動荷重の低減物量の低減と格納容器内作業性向上も図っている。

これらの成果を反映した建屋一体型RCCVと原子炉建屋の概念図を図11に示す。

4.1 円筒型RCCV

図12に円筒型RCCVの概念図を示す。ABWRではインターナルポンプ型原子炉再循環システムを採用しているため、大口径一次系再循環配管がなく、コンパクトな格納容器に収めることができる。また安全系配管を操作作業床(グレーチング)下部に分離配置し、RCCV内での従事者が受ける放射線量低減を図っている。このため、RCCVは従来の改良標準型原子炉格納容器と比べて出力比を考慮すると、表2に示すように20%以上内容積が低減されている。

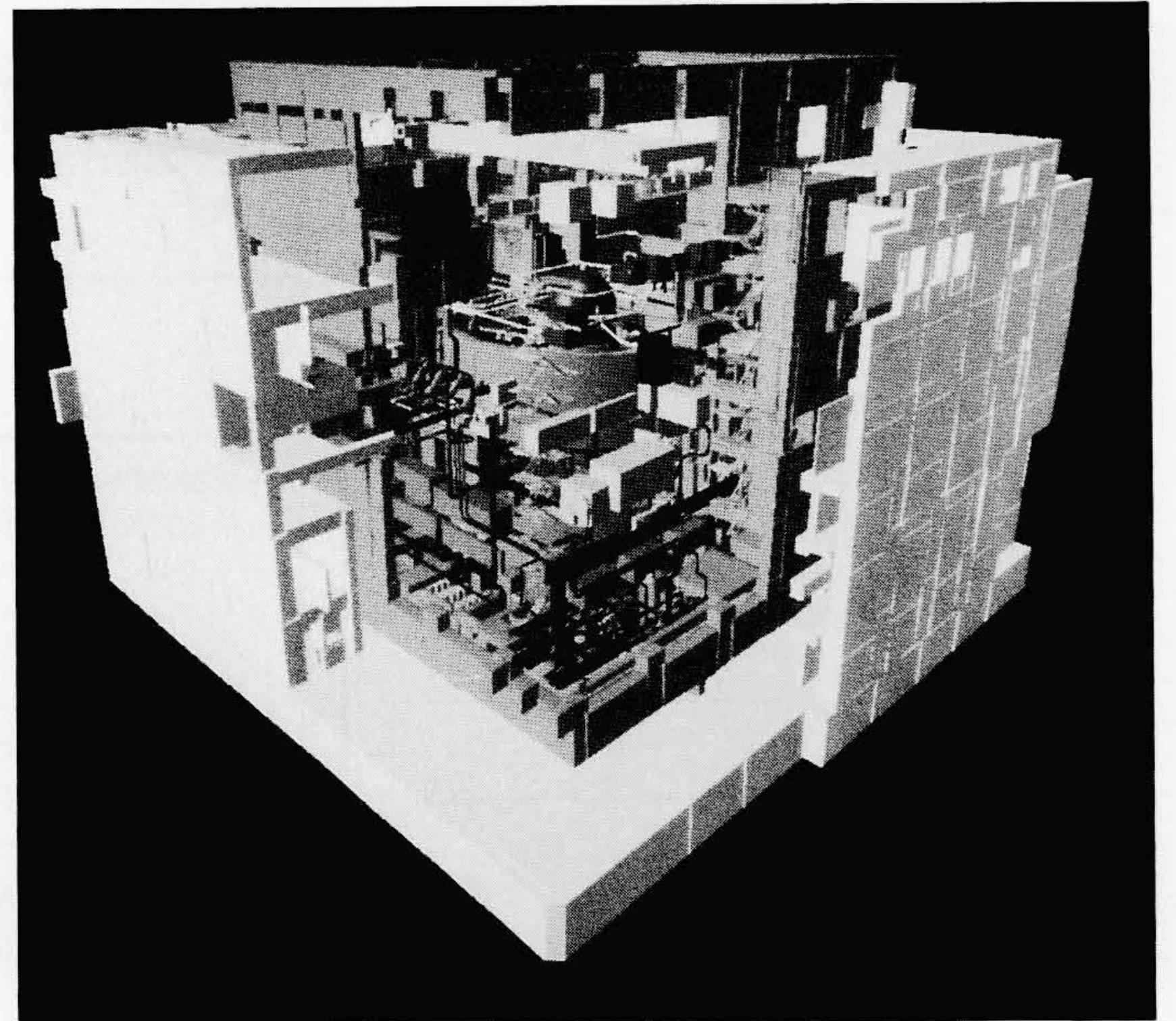


図11 建屋一体型円筒型RCCV(鉄筋コンクリート製原子炉格納容器)と原子炉建屋の先行プラントフレームの比較 ABWRの原子炉建屋は、建屋一体型円筒型RCCVの採用によってコンパクト化されており、先行プラント(電気出力1,100 MWクラス)の建屋フレームにすっぽり入る。

円筒型RCCVは、耐圧機能を鉄筋コンクリート(軀)体に、耐漏えい機能を内張りした鋼製ライナプレートに持たせた設計となっている。このような設計に関して、基礎的な実験及びモデル実験を、学識経験者の助言を得ながら東京電力株式

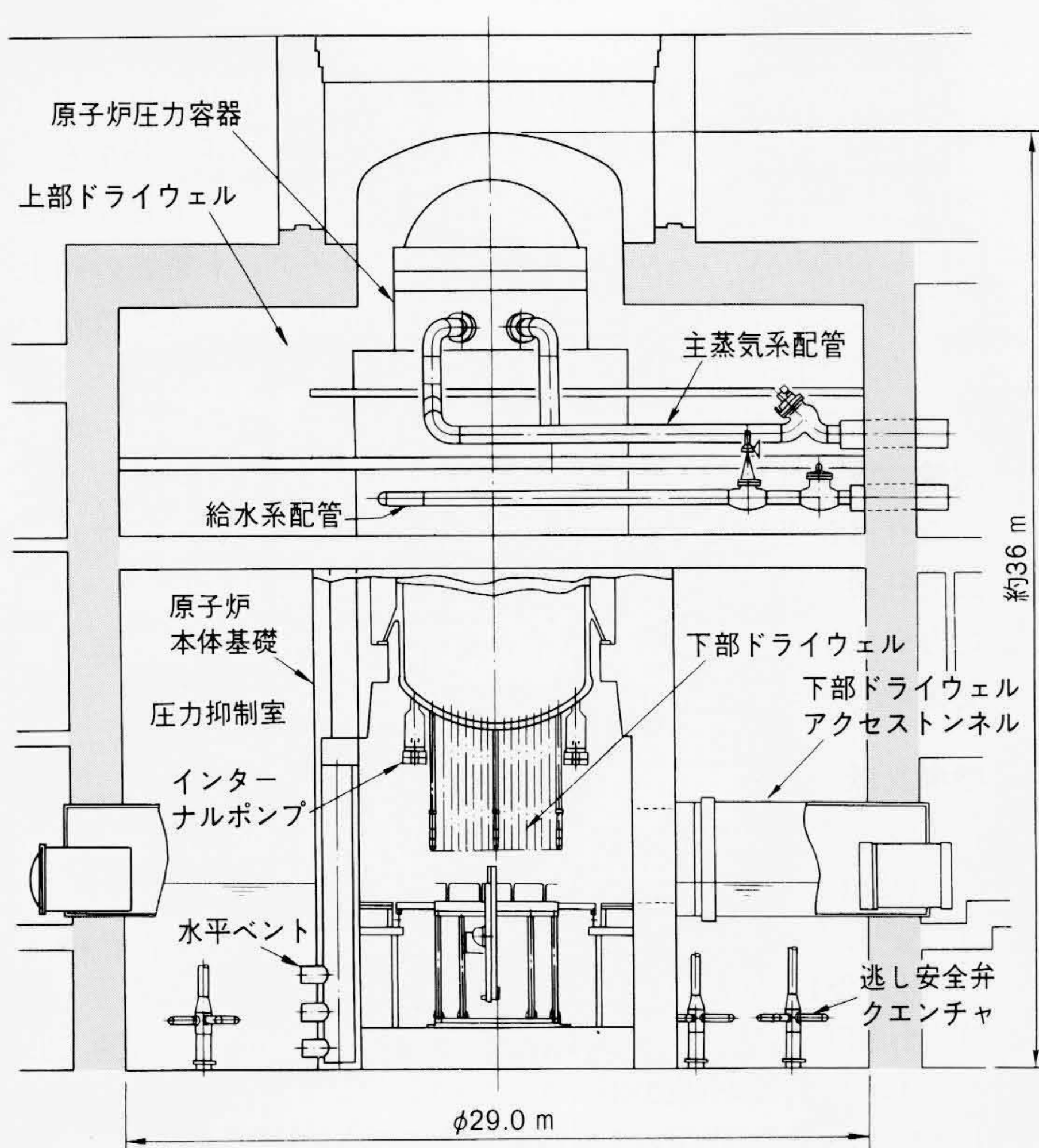
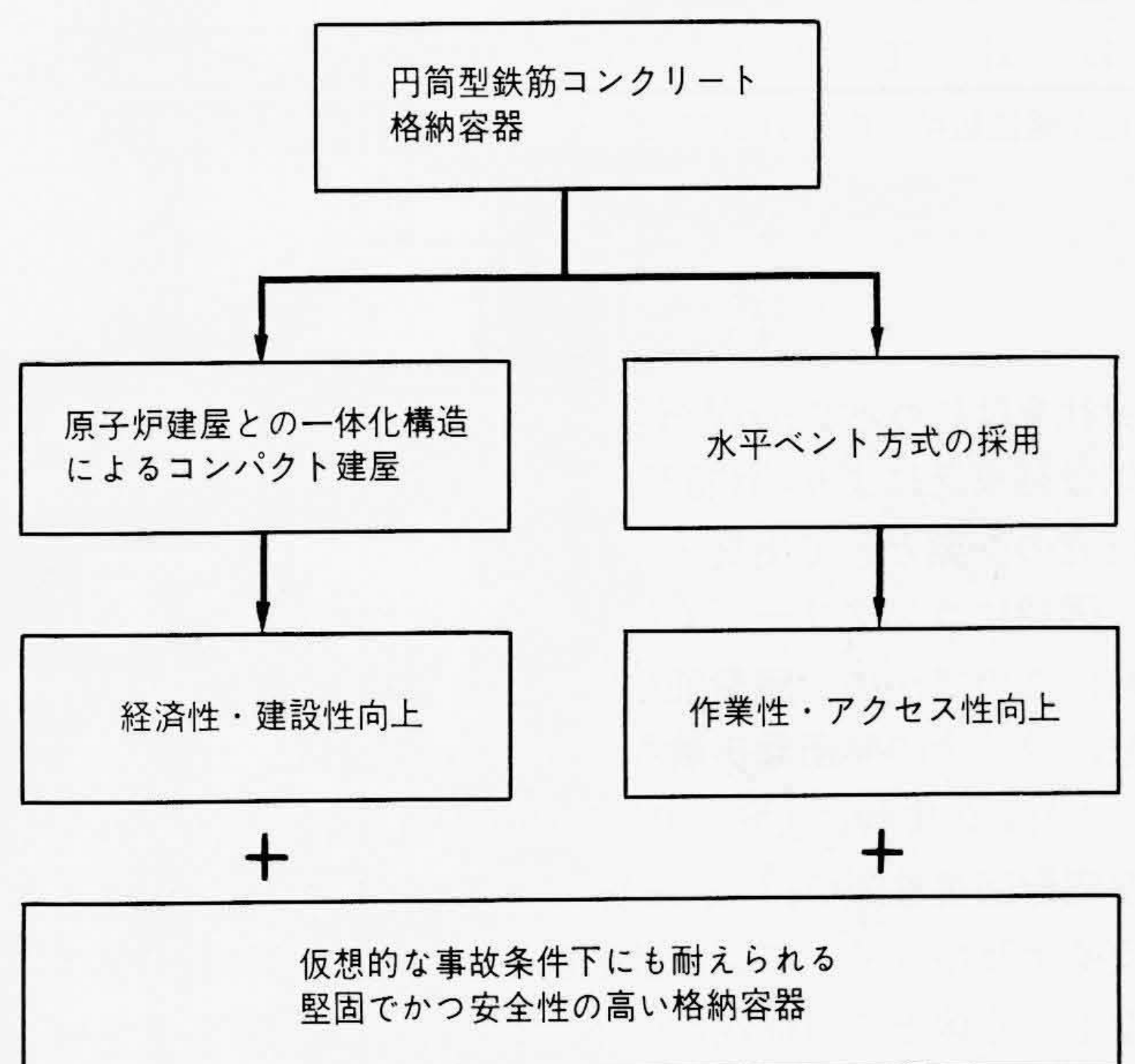


図12 円筒型RCCV概念図 鉄筋コンクリート製の原子炉格納容器は円筒型の建屋一体型構造であり、直径29 mのコンパクトな形状になっている。



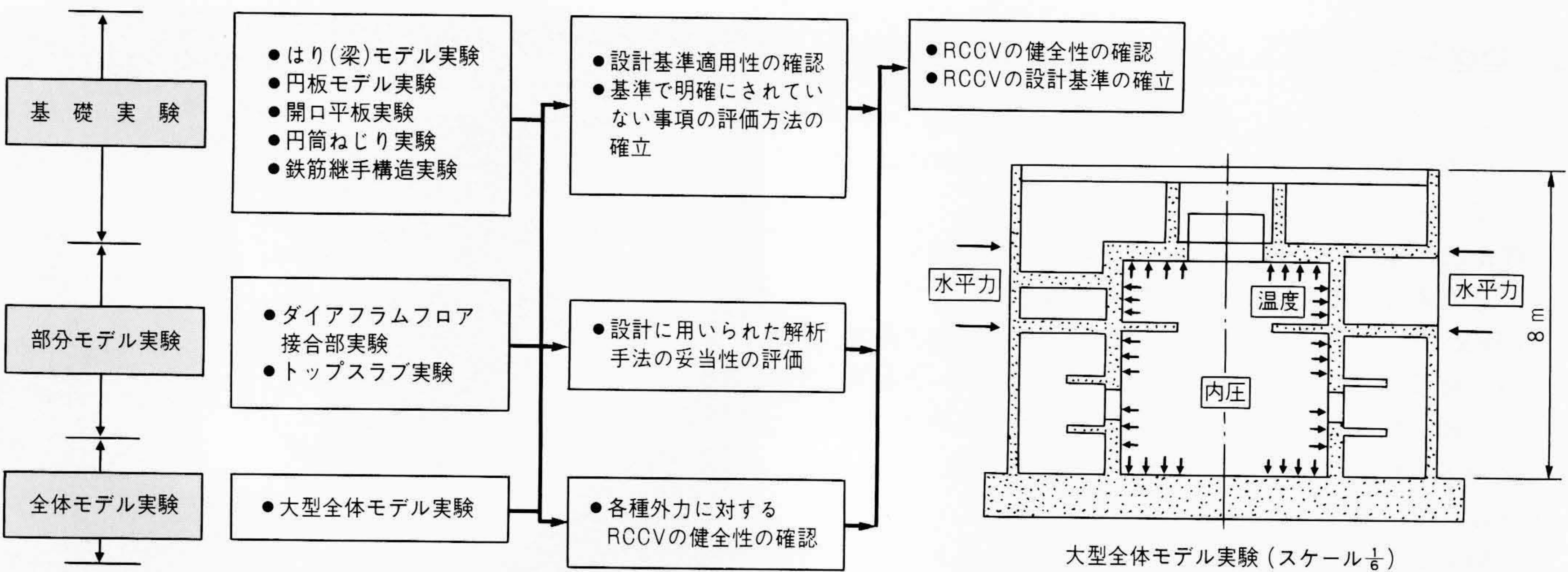


図13 コンクリートく体に関する主な実験項目と適用 RCCVの健全性は、基礎実験、部分モデル・全体モデル実験などにより仮想的な事故条件下でも十分堅持されることを確認した。この成果は実設計の基準に反映される。

表2 円筒型RCCV及びMARK-II改良標準型原子炉格納容器の主要仕様の比較 鉄筋コンクリート製円筒型及び水平ベント方式の採用などによって、MARK-II改良標準型に比べて出力当たり約20%の容積低減を実現した。

原子炉格納容器		円筒型RCCV	MARK-II改良標準型
項目		(電気出力1,356 MW)	原子炉格納容器 (電気出力1,100 MW)
内 径		29 m	29 m(圧力抑制室)
全 高		約36 m	約48 m
ドライ ウェル 容積	上部ドライ ウェル容積	約5,500 m ³	約7,400 m ³
	下部ドライ ウェル容積	約1,900 m ³	
圧力抑制室空間容積		約5,600 m ³	約5,700 m ³
圧力抑制室水容積		約3,600 m ³	約4,000 m ³
設 計 圧 力		ゲージ圧310 kPa {3.16 kgf/cm ² }	ゲージ圧310 kPa {3.16 kgf/cm ² }

注：略語説明 RCCV(鉄筋コンクリート製原子炉格納容器)

会社をはじめとするBWRユーザー電力会社、日立製作所、株式会社東芝により昭和56年から昭和62年にわたって電力共同研究の一環として実施・完了した。

図13にコンクリートく体に関する主な実験項目を示す。実験はこのほかに、鋼製部分であるライナアンカの変形特性実験、ライナの熱衝撃実験などが行われた。

これらの実験により、円筒型RCCVは設計荷重レベルで十分な変形回復性能を持ち、鉄筋ひずみも弾性範囲内にあること、ライナ及びライナアンカは破断やアンカが引き抜けることもなく、く体との追従性が確認され気密性が確保されていることが確認された。

4.2 水平ベント方式の採用

ABWRでは、ドライウェル部と圧力抑制室を連結するベント管の放出口を水平にした水平ベント方式を採用している。

この方式では原子炉压力容器基礎部をベント管として利用できることから、格納容器内のスペース効率が高まるとともに、従来の垂直ベント方式に比べてベント管などの物量の低減が可能となる。更に、ダイアフラム床にベント管を装着していないため、床上のアクセス性、作業性が向上し従事者が受ける放射線量の低減にも役立っている。また、ベント管の工場製作組立てが可能で、大型プレハブ化、品質向上にも寄与している。

一方、水平ベント方式を採用するに際し、原子炉の配管破断を想定した事故時の圧力抑制機能、及び動荷重確認試験も完了し、動荷重が低減され格納容器性能が万全であることも確認している。

5 結 言

ABWRは既に実証されている改良標準型BWRの技術をベースに、欧米諸国で実績のある技術を加え、BWRの特徴を十分に生かした安全性、経済性の極めて高いプラント作りを目的としたものであるが、更にいっそうのプラント特性の向上を目指して、改良に改良を重ねた技術を駆使し、要素技術の特性を最大限に生かした設計を心がけてきた。

これまでの社内試験のほか、国産化技術、性能確証・実証試験の成果は所期の期待を上回るものとなっている。

これはひとえに、東京電力株式会社殿をはじめ東北電力株式会社殿、中部電力株式会社殿、北陸電力株式会社殿、中国電力株式会社殿及び日本原子力発電株式会社殿の御指導・御支援のたまものであり深く感謝する次第である。

参考文献

1) 堀内, 外: ABWRの技術的特徴, 日立評論, 68, 4, 275~280 (昭61-4)

2) 桜井, 外: インターナルポンプシステムの開発, 日立評論, 68, 4, 281~286 (昭61-4)

3) 小山田, 外: 円筒型原子炉格納容器と建屋配置, 日立評論, 68, 4, 291~294 (昭61-4)

4) 杉崎, 外: ABWRの工学的安全施設の技術的特徴, 日立評論, 68, 4, 287~290 (昭61-4)