

---

## 沸騰水形原子力発電設備特集

---

最近の沸騰水形原子力発電設備	59
中国電力株式会社 島根原子力発電所第1号機 460 MW の建設	64
大容量原子力タービン発電機	69
BWR プラントの炉心性能計算シミュレーション	75
◎再循環ポンプ用可変周波数電源 MG セット	79
バーナブルポイズン核特性の実験と解析	84
日立製作所における原子力機器の耐震研究	88

---

# 最近の沸騰水形原子力発電設備

Recent Progress in BWR Power Plant

中崎 豊一郎\* 是井 良朗\*\*  
Toyoichirô Nakazaki Yoshiaki Korei

## 要 旨

現在、急ピッチで建設が進んでいる沸騰水形原子力発電所の大半は、アメリカ GE 社が提唱するブラウズ・フェリー形標準プラントであるが、近年ジンマー形標準プラントが採用され始めている。そこでジンマー形プラントの特長と従来よりの改良点について紹介し、BWR の進歩の一端を展望する。

また、最近特に話題に採り上げられる放射性廃棄物処理に関し、かねてから日立製作所で開発してきた設備、方式についても紹介する。

## 1. 緒 言

近年、世界各国で原子力発電所があいついで運転にはいっており、また、1970年の建設計画においては年間2,000万kWを凌駕(りょうが)するはなばなしさである。わが国においても、すでに運転、建設にはいったものが十指を越す現状である。

特にアメリカにおいては原子力発電設備の発注が順調に伸びており、1971年3月末の運転中および建設中の原子力による総発電容量が9,200万kWに達している。この主体は軽水炉であるが、このうち GE 社の製造する BWR は45基、3,400万kWを占めている。

これら GE 社の BWR は数年来、プラントの標準化が地道に遂行されており、出力別には500MW級、800MW級および1,000MW級(図1)、また、形式別にはドレスデン#2形、ブラウズ・フェリー形およびジンマー形(これらは従来それぞれ1965年形、1967年形、1969年形と呼ばれていた)と大別することができる。これらプラントの年別発注状況をみると、近年プラントの大容量化が進んでいることがうかがわれる。したがって燃料費に比べて建設費が割高のため不利となっていた発電コストの引き下げの効果をも果たしていることがわかる。

このように BWR プラントが数多く建設されているのは、すぐれた炉特性に加えて経済性においても従来の発電プラントとじゅうぶん競合できるためであり、さらにきわめて安全性の高い原子炉であるからにはほかならない。

最近の BWR の大きな特長としては、

### (1) 高出力密度炉心の改良と標準化

従来、初期炉心に装荷されていたポイズン・カーテンに代えて燃料内にバーナブル・ポイズンを使用している。また、燃料は2種類の燃料タイプに統一され、プラント出力にかかわらずどのプラントにも共通して使用できるようにしてある。

これらにより燃料燃焼度の向上を図るとともに、ポイズン・カーテン取り出しのための余計な手間が省けるようになった。

### (2) MARK-II 形原子炉格納容器の採用

従来設置されてきた圧力抑制形鋼製格納容器と同じ原理を用いたものであるが、構造が改良され、より建設の便が図られている。

### (3) 再循環流量制御にバルブ・コントロールを提案

従来の MG セットを用いた再循環ポンプの回転数制御による再循環流量制御に代って、再循環系に設けられた絞り弁により直接流量を制御する方式が提案されている。

### (4) 非常用炉心冷却系に高圧炉心スプレイ系を採用

高圧注水系と炉心スプレイ系とを併合して、その両者の機能を

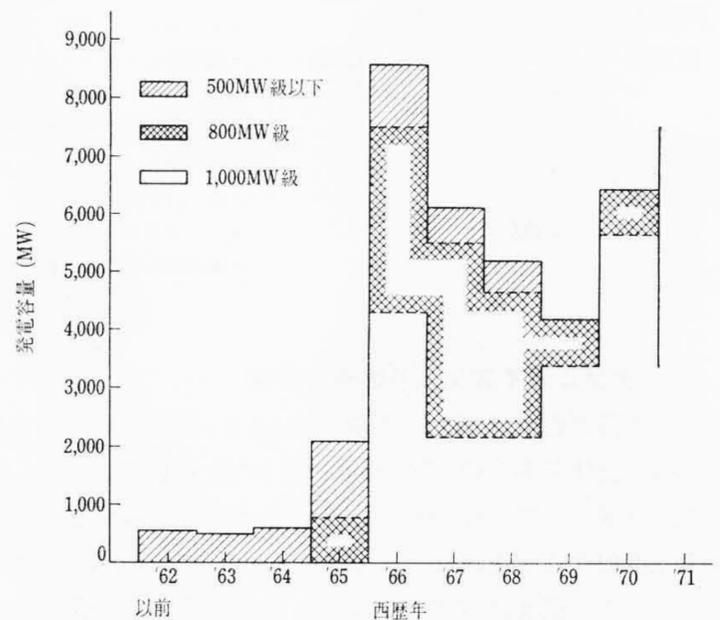


図1 アメリカにおける BWR の年別発注状況

もった高圧炉心スプレイ系に置き換えられている。また、低圧注水系は直接原子炉圧力容器に設けたノズルから注入するようにしてある。

などがあるが、特に(2)(3)(4)がジンマー形の代表といえる。この特長をブラウズ・フェリー形プラントのそれらと比較して示したのが表1である。

最近特に話題になるものの一つに放射性廃棄物処理設備があり、日立製作所では、以前からこの問題を重要視して開発を行ない需要に即応できるよう努力してきたが、このおもなるものは、

- 希ガスホールドアップ装置
- 濃縮廃液の仮焼固化装置
- 焼却装置

などである。これらのうち、希ガスホールドアップ装置は国の内外を問わずすでに幾つかのプラントに採用され、着実に実用化の歩みを続けている。

以上のように最近の BWR は、いわゆるブラウズ・フェリー形(1967年形)をベースに若干の変更、改良を加えたものであり、本質的には同一形式といえる。現在、建設が着々と進行しているプラントの大半はブラウズ・フェリー形であるが、最近ではジンマー形と呼ばれるプラントがぼつぼつ顔を出し始めてきた。ここではジンマー形に焦点を絞り、改良点、特質について紹介するとともに、最近つとに脚光を浴びている廃棄物処理方式についても言及する。

## 2. 炉心の改良と標準化

最新の BWR 初装荷炉心は、従来形炉心の運転実績や種々の試験、開発の成果を取り入れ、次のような改良が加えられている。

\* 日立製作所日立工場

\*\* 日立製作所電力事業本部

表1 ジンマー形プラントの特長

項目	ブラウンズ・フェリー形プラント	ジンマー形プラント
1. 再循環系統	<ul style="list-style-type: none"> <li>再循環流量制御は再循環ポンプの回転数変化によって行なわれる。そのため流体継手付き可変周波数電源MGセットを設けている。</li> <li>再循環ループはジンマー形プラントより長く太い。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>流量制御はポンプ出口にとりつけた絞り弁により直接行なわれる。</li> <li>再循環ループの長さ、口径は最小となるよう最適設計がとられている。</li> </ul>
2. リリーフ、バイパス容量	<ul style="list-style-type: none"> <li>バイパス容量は運転の要求に従って105%または25%を採用している。25%容量では発電機トリップ時に炉のスクラムが避けられない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>リリーフ弁60%、安全弁20%、バイパス弁25%容量を設けている。これらを同時作動させ105%容量をまかない、発電機トリップ時にも炉スクラムを回避する。これをREVAB系と呼んでいる。</li> </ul>
3. 非常用炉心冷却系(ECCS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>高圧注水系 (HPCI)</li> <li>オートリリーフ系 (AR)</li> <li>低圧炉心スプレイ系 (LPCS)</li> <li>低圧注水系 (LPCI)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高圧炉心スプレイ系 (HPCS)</li> <li>オートリリーフ系 (AR)</li> <li>低圧炉心スプレイ系 (LPCS)</li> <li>低圧注水系 (LPCI)</li> </ul>
4. 格納容器	<ul style="list-style-type: none"> <li>ドライウエル (電球形)</li> <li>トーラス (ドーナツ形)</li> <li>鋼製</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ドライウエル・トーラス (円すい台形)</li> <li>コンクリート製</li> <li>MARK-II形と呼んでいる。</li> </ul>

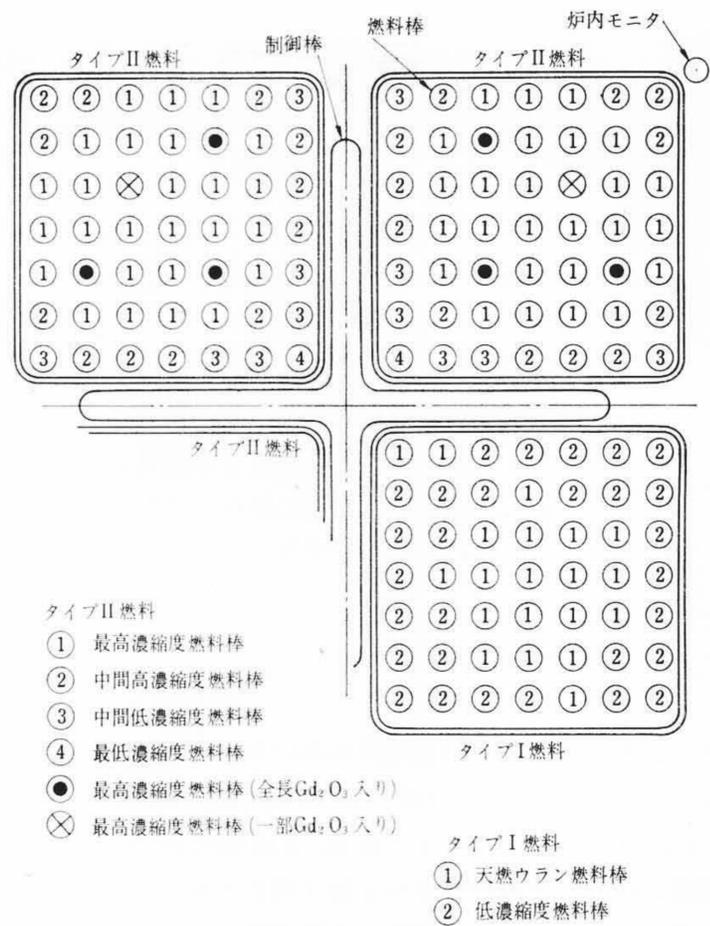


図2 燃料集合体濃縮度分布例

2.1 バーナブルポイズン入り燃料の使用

従来の初装荷炉心にはボロン不銹(ふしゅう)鋼製のポイズンカーテンを燃料集合体どおしの間隙(かんげき)に装着していたが、新しい炉心ではガドリニア ( $Gd_2O_3$ ) をバーナブルポイズンとして一部の燃料棒に添加することにより、ポイズンカーテンの装着を不要なものにしている。図2はガドリニア入り燃料集合体の一例である。同図において、タイプIIの燃料集合体を構成する49本の燃料棒のうち●で示す3本の燃料棒には全長にわたってガドリニアが添加され、⊗の燃料棒には部分的に添加されている。

バーナブルポイズン入り燃料を使用した場合の利点は、

- (1) カーテンの着脱、用済後の処理などが不要になり、第1サイクルの炉心運転管理がより容易になる。
- (2) ポイズンカーテン使用の場合は、サイクルの末期においても未燃焼のボロンおよび不銹鋼による中性子吸収のため数パーセントの反応度減損があるが、バーナブルポイズン使用の場合は反応度減損がなく、後述の2種類の異なるタイプの燃料の使用と合わせて燃料燃焼度をかなり向上させることができる。
- (3) バーナブルポイズンの高さ方向の配合を適切に調整することにより出力分布の制御が容易になる。

などが考えられる。

2.2 2種類の燃料タイプの採用

新しい炉心ではタイプIと呼ばれる平均濃縮度の低い燃料と、これより濃縮度の多少高いタイプIIと呼ばれる燃料を使用している。これらの濃縮度分布は図2に示すとおりである。

局所的な出力のピークを減少させるためタイプI燃料には天然ウラン燃料棒を含む2種類の燃料棒を使用し、タイプII燃料では濃縮度の異なる4種類の燃料棒を用いている。図3はタイプI燃料とタイプII燃料の炉心内配置の一例を示すもので、局所出力分布のピークを押さえ、また反応度制御がじゅうぶん行なえるように決定されるものである。

このように2種類の燃料タイプを用いることにより下記の利点が生ずる。

- (1) 第1サイクル末期に低濃縮のタイプI燃料を取り出せば、

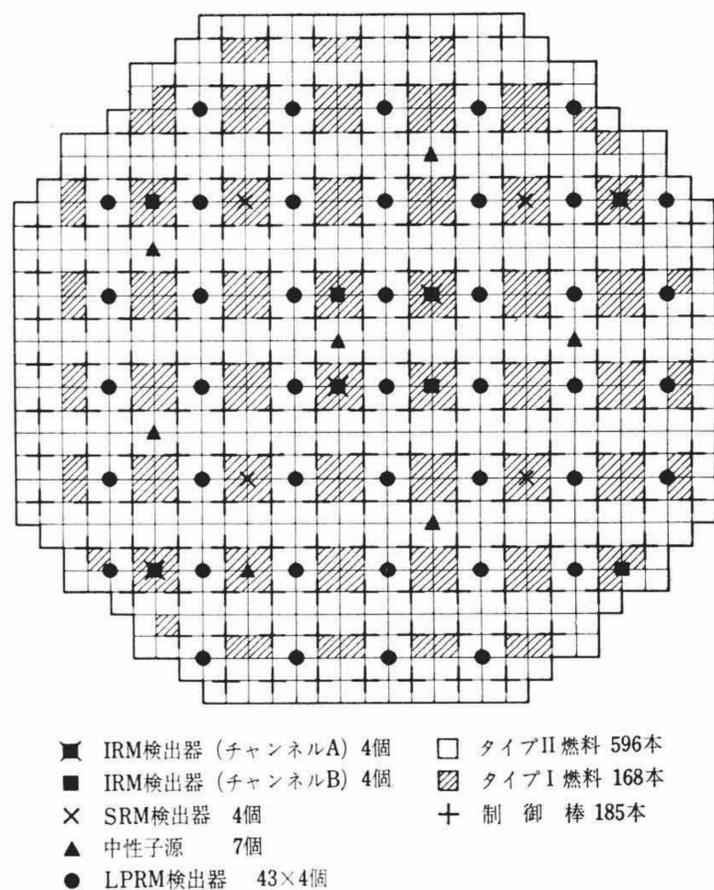


図3 炉心配置例

第2サイクル以降には濃縮度の高い燃料が残るので初装荷炉心の平均燃焼度を向上させることができる。

- (2) 第1サイクル末期に取り出されたタイプI燃料は、元来、濃縮度が低く、しかもじゅうぶん燃焼させてあるので、第2サイクル以降の炉心に再装荷する必要がなく、使用済燃料貯蔵量を減らすことができる。
- (3) 2種類の燃料の装荷本数の割合を変更することにより炉心平均濃縮度の調整が可能となり、出力の異なるプラントにもまったく同一の燃料が使用でき、出力によらず燃料が標準化されている。

表2 標準燃料の主要仕様

UO <sub>2</sub> ペレット径	12.4φ mm
ジルカロイ-2被覆管	14.3 OD×0.8 t mm
燃料有効長さ	3,658 mm
プレナム長さ	406 mm
燃料棒の配列	7×7
燃料集合体外形寸法	138□×4,467 mm

表3 ジンマー形採用例

プラント名	所有者	出力		運転開始 予定	採用状況		
		熱出力 (MW)	電気出力 (MW)		再循環 弁	MARK-II 格納容器	ECCS
Shoreham	Long Island Light Co.	2,436	819	'75-5		○	
Limerick #1, #2	Philadelphia Electric	3,293	1,100	'75-3 '77-3		○	
William H. Zimmer #1, #2	Cincinnati Gas & Elec. Co.	2,436	840	'75 '76	○	○	○
La Salle #1, #2	Commonwealth Edison	3,293	1,100	'75-10 '76-10	○	○	○
Bailly	NIPSCO	2,436	~800	'76	○	○	○

以上のように最新のBWRでは燃料の高燃焼度化と炉心特性向上のための改良が行なわれている。

特にBWRの燃料としてはその初期の時代(1950年代後半のVBWR, ドレスデン#1)以来, UO<sub>2</sub>ペレットをジルカロイ-2で被覆した燃料棒を用い, 各種条件下における数多くの経験を有している。さらに近年BWRプラントの標準化とともにこれらの経験をもとに燃料集合体の標準化が行なわれている。表2はその主要仕様である。

### 3. ジンマー形プラントの特長

現在, 建設中, 計画中のプラントは大半がブラウンズ・フェリー形であるが, 1975年以降に運開を予定されているプラントの幾つかにジンマー形を採用したものが始まっている。表3はジンマー形採用プラントの例である。

#### 3.1 流量制御弁による再循環流量の制御

BWRプラントの原子炉出力制御方式としては制御棒の出し入れによる方式と, 再循環流量を増減させる方式とがあり, 前者は大幅な出力変更の場合に, また後者は約35%以内の出力変更の場合にと使い分けが考えられている。

再循環流量による原子炉出力制御方式はBWRに特有なものであり, その特長としては,

- 出力変更速度が早いこと
- 炉心内の中性子束分布をほぼ一定に保てること
- 負荷要求信号を制御器に導くことにより自動負荷追従運転ができる

ことなどがありすぐれた制御方式といえる。

在来のBWRでは再循環流量制御方式として, MGセット(可変周波数電源装置)を用いて再循環ポンプモータの回転数を変化させ, これによって再循環流量を変化させているが, ジンマー形プラントでは再循環ポンプモータの回転数を一定にしておき, ポンプ出口に設けた流量制御用絞弁によって再循環流量を変化させる方式を採用している。この方式によればMGセットの回転慣性がないため再循環流量を素早く変化させることが可能である。

負荷変化要求信号を再循環流量制御器に導くとともに, 主蒸気圧力調整装置にも導き, 一時的にタービン加減弁開度を変更することによってタービン蒸気流量をすばやく変化させることができる。したがって負荷追従特性は改善されることになる。

一例として原子炉が一定出力で運転されている際に+10%のステップ状の負荷増加要求信号が加わったときの出力応答特性について, 弁制御の場合とMGセットによる制御の場合とを比較してみると図4のようになる。

#### 3.2 MARK-II 形格納容器

格納容器は従来, 電球形のドライウエルと円環状の抑制室より構成されていたが, このドライウエルと抑制室を一体構造にした

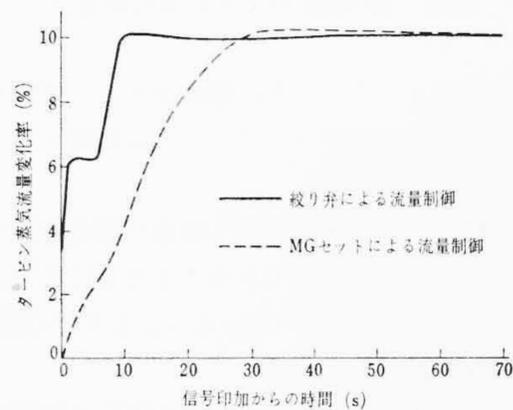


図4 10%負荷増加要求のあった場合のタービン蒸気流量変化

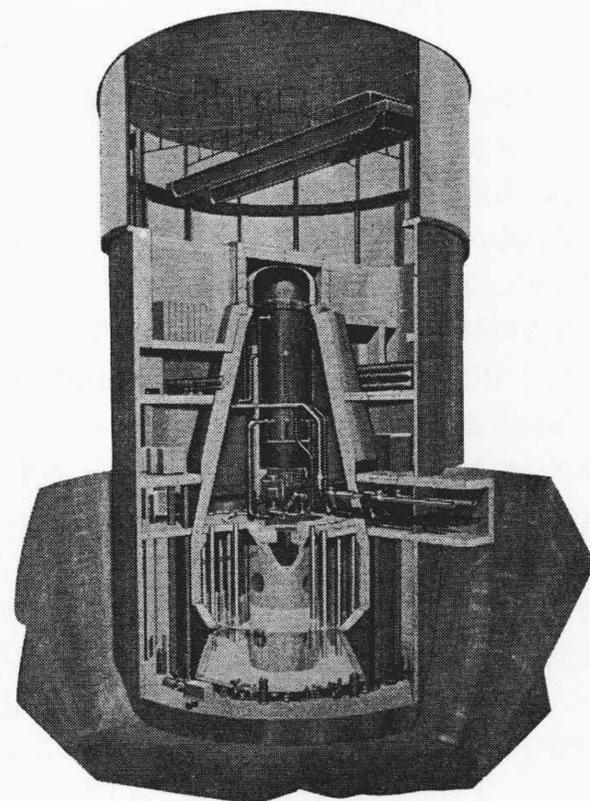


図5 MARK-II形格納容器全体図

MARK-IIと呼ばれる格納容器がGE社により開発された。これは図5に示すように, 圧力抑制室をドライウエルの真下においた円すい台形の格納容器で, 従来の格納容器に比べ構造が著しく簡単になっている。圧力抑制室とドライウエルの仕切りは鋼板ライニングをしたコンクリート床により形成されており, このコンクリート床には多数の下降管が設けられ, 事故時にドライウエル内に充満する蒸気を抑制室内の水中に導く役目をしている。MARK-II形にも幾つかのタイプがある。その第一は円筒部, 円すい部, 上鏡部を通常の耐圧鋼板製容器とし, 抑制室の平底を非耐圧部として鋼板ライニングとするもので, これは従来の技術の延長でそのまま可能であり, 簡単な構造の利点をよく生かしたものと見える。その第二は, 円筒

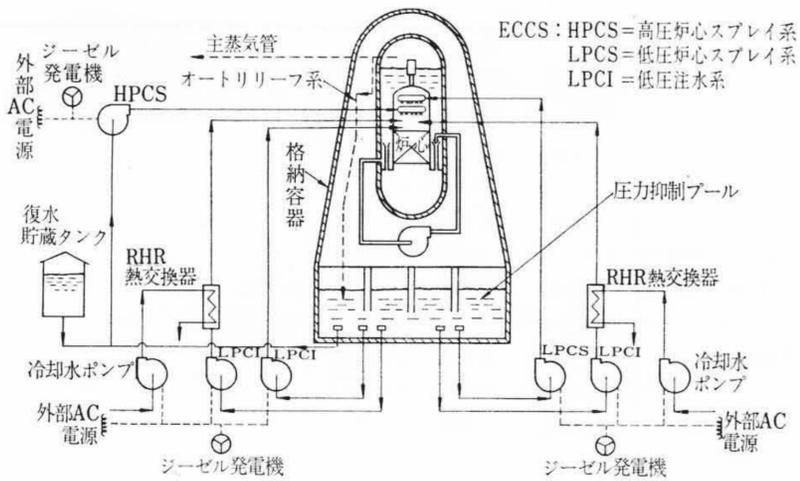


図6 69年形 ECCS の系統概要図

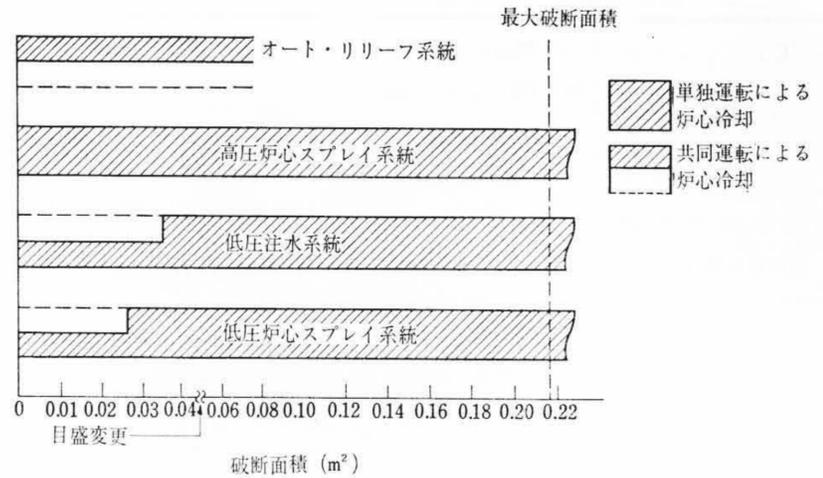


図7 ECCS 性能バーチャート

部と円すい部を補強コンクリートに鋼板ライニングとするものである。これは耐圧部として補強コンクリートに鋼板ライニングをしたものを用いる点に特長がある。

MARK-II 形格納容器はその簡単な構造の利点を生かしたこと、および従来技術がそのまま使用できることなどにより、表3からもわかるようにジンマー形のうちでは、もっとも多く採用例がある。

3.3 非常用炉心冷却系

ジンマー形プラントの ECCS は従来の ECCS の機能をそのまま受け継いだものであるが、設備が簡潔となり、それだけ高い信頼性が期待されるものとなっている。図6は新しいECCSの系統概要図である。ECCSは、高圧炉心スプレイ系(HPCS)、低圧注水系(LPCI)、低圧炉心スプレイ系(LPCS)およびオート・リリーフ系で構成されている。

高圧炉心スプレイ系は約 84 kg/cm<sup>2</sup>g 以下で作動し、ポンプにより復水貯蔵タンクまたは圧力抑制室の水をスプレイスパーチャを通して炉心上部へ直接スプレイするもので、事故時、原子炉が高圧に保たれている間も水位を維持するにじゅうぶんな注水量が確保される。冷却水が炉心に注入されるに従って原子炉は減圧され、それに応じて注水量も増加していく。このように高圧炉心スプレイ系は従来の高圧注水系(HPCI)と炉心スプレイ系の機能を単一系統で兼備しており、系統構成を非常に簡単なものにしていく。

低圧注水系は独立した3系統で構成されており、各系統は注入ポンプにより圧力抑制プール水を直接炉心へ注入するようになっている。この方式を採用すると注入時の弁操作が簡単になり、かつ弁操作の所要時間が短縮される(約10秒)こと、また炉心への直接注入により流動抵抗が小さくなりポンプ所要動力が軽減されること、炉心上部から大量の冷却水を注入することにより従来以上に有効な炉心冷却が期待できること、ポンプの設置台数が減ることなどの点で従来のものより簡略となり、性能の面で向上したものとなっている。

上記のほかには設けられている低圧炉心スプレイ系およびオート・リリーフ系は従来と同じ系統構成になっており特別な変更はない。

ジンマー形 ECCS は図6に示す系統構成になっているので、冷却材喪失事故と同時に外部 AC 電源の喪失を仮定し、さらに任意の単一故障を想定するというきびしい条件の下でも、スプレイ冷却を含めた3系統以上の機能が確保され、スプレイおよびリフラッドによる炉心冷却が達成される。

図7は ECCS の性能バーチャートである。高圧炉心スプレイ系は全破断面積にわたって単独で炉心冷却を達成できることが示されている。またいかなる破断の場合にも常に ECCS は重複して働くことが示されており、じゅうぶんな多重性が備えられていることがわかる。

4. 廃棄物処理設備

原子力発電所に設けられる放射性廃棄物処理設備は、発電所の運転に伴って発生する気体、液体、固体を含むすべての放射性廃棄物を最終的に処理、処分する設備であるが、日立製作所では早くからその重要性に着目し、従来よりも一歩進んだ新しい放射性廃棄物処理設備の確立を目ざし開発研究に着手してきた。

その基本的指針は所外放出放射能の低減と固体廃棄物の減容であり、開発研究の成果はすでに一部実用化に結実している。新しい処理設備のフローシートを図8に示し、以下その機能について説明する。

4.1 希ガスホールドアップ装置

BWR プラントから排出されるガスは大部分空気であるが、その中に微量の核分裂ガス(クリプトン、ゼノンなど)が含まれることがある。これら希ガスの放射能を減少させるため日立製作所では昭和44年より動力炉核燃料事業団の委託を受け、希ガスホールドアップ装置について基礎実験、実規模実験を通じ、システムの実証開発を続けてきた。

この装置は除湿機器、活性炭吸着塔、高性能フィルタ、吸引ポンプなどから構成されている。除湿機器は、活性炭の吸着性能に悪影響を及ぼす水分をあらかじめ除去するために設けられ、水分を除去したのち、排ガスは活性炭吸着塔へ導かれる。

このとき、非放射性的な空気はそのまま塔内を通過するが、上記希ガスは活性炭層において吸着、脱着を繰り返す、一定の時間遅れをもって活性炭層を通過する。この遅れ時間がホールドアップ期間に相当し、クリプトンに対して数十時間、ゼノンに対して数十日に及ぶホールドアップ時間を選ぶことは、さほど難事ではない。この結果、放出排ガスによる被曝線量を従来に比べて著しく低下できることになる。なお、装置の最終段には系統を負圧で運転し、放射性ガスの漏えいを防止するために、真空ポンプなどを設けるのが常である。

4.2 濃縮廃液の仮焼固化装置

原子力発電所の復水浄化系統に使用されているイオン交換樹脂は薬品による再生後、再使用する方式が採られている。再生時には酸とアルカリを使用するので、その結果再生廃液が発生する。従来この再生廃液は濃縮器により、減容比に換算すると約1/20まで濃縮され、その後ドラム缶内で固化していた。

しかし、このとき発生するドラム缶数も多く、その貯蔵場所を必要とすることから、濃縮した廃液をさらに加熱して水分を完全に蒸発し、成分を析出固化させることによりいっそう減容を図る仮焼固化法に着目し開発研究を進めてきた。このプロセスを採用することにより濃縮廃液は約1/10に減容可能である。

すでに、仮焼固化の速度論的解析、仮焼容器の腐食などの基礎的検討を完了し、現在システム全体の動特性確認、あるいは信頼性の

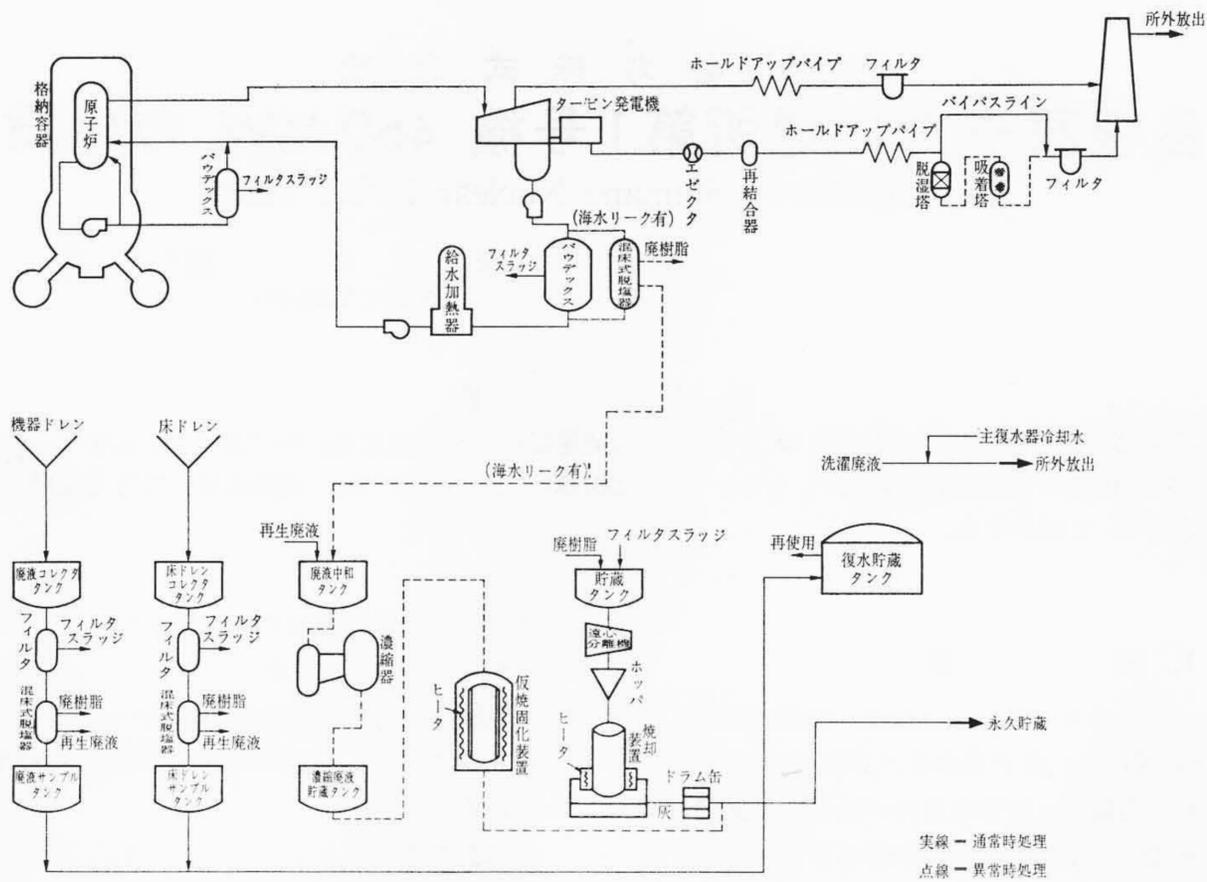


図8 BWR 発電所の放射性廃棄物処理フローダイアグラム

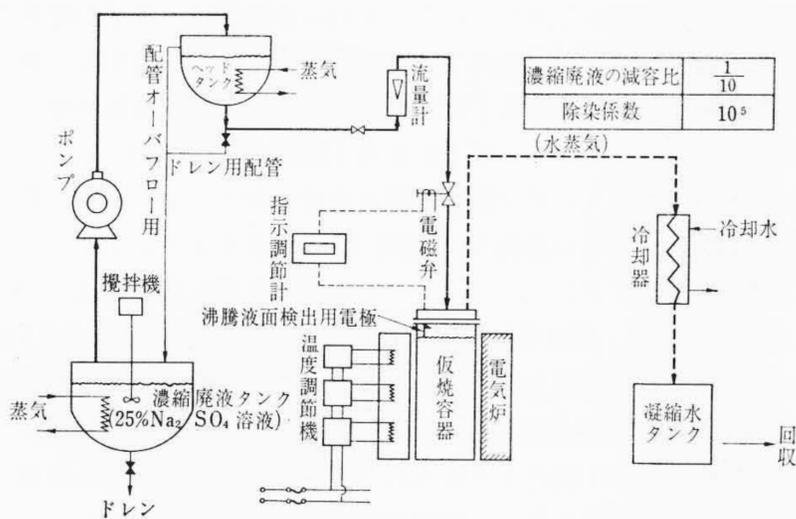


図9 濃縮廃液の仮焼固化装置系統図

実証など実用的な問題点の検討を主眼とした実規模プラントを作成中である。

このプラントは廃液供給系、仮焼固化系、蒸発水分回収系より構成されており、模擬濃縮廃液は電気炉内へあらかじめ設置された仮焼容器へ連続供給され加熱される。蒸発した水分は冷却器により凝縮後、回収する方式になっている。仮焼容器の搬入、搬出をはじめすべての運転操作は実用装置への直接反映を念頭において遠隔手動を基本としている。実規模プラントのフローシートは図9に示すとおりである。

### 4.3 焼却装置

原子力発電所の水処理設備として従来広く使用されているフィルタはエレメントにセルローズ系濾過助材をプリコートし、差圧が一定値に到達すると自動的に逆洗し、再び新しい助材をプリコートする形式である。

これらの廃棄物は可燃性であることから、従来のドラム缶内固化に代わる抜本的処理方法として焼却することをねらい、実験的検討の結果、フィルタスラッジについて約1/100という大きな減容が可

能であることを確認した。

現在、イオン交換樹脂の最適焼却法確立と並行して、実規模プラントを作成中である。プラントは焼却炉とオフガス設備よりなるもので、オフガス設備は腐食問題あるいは焼却灰分の取扱いなどの考慮から乾式法に基づいている。

なお、原子力発電所の運転に伴い、紙、布、衣類などの低放射能の可燃性固体廃棄物が排出されるが、これらの廃棄物を対象とした専用焼却炉も計画中である。

### 4.4 床ドレンの回収再利用

BWRでは従来から床ドレン、洗濯廃液以外は回収再利用しているが、さらに床ドレンを、イオン交換塔で脱塩処理するか、あるいは蒸発器により濃縮処理するかによって回収再利用し、系外へ放出される廃液は洗濯廃液のみにすることを計画している。

## 5. 結 言

以上、最近のBWRについて、進歩、改良の一端を紹介したが、前述のようにBWRプラントの基本形は、現在各地で建設が進んでいるいわゆるブラウンズ・フェリー形であることに変わりなく、その一部が改善され、標準化されてきているといえる。

また、このほかに、すでにアメリカにおいては供用期間中検査が、ASME Boiler and Pressure Vessel CodeのセクションXIに、1970年以来、正式に規格化されており、わが国でも電気協会が規程化されつつあるので、これらの結果を反映したプラントへの具体的な変貌もみられようが、これらは本質的なBWRの改造ではなく、より運転に便利な、より安全性の高いプラントへの進化であると言える。

ともあれBWRプラントは開発段階を過ぎ完全な実用段階にあり、じゅうぶん火力とも競合できる状態にある。しかし、今後運転実績をもとに、さらに安全で、かつ、より経済的なBWRへと改善されていくことは明らかであり、そのための開発も当然今後とも続けていく必要がある。