

地球社会と共生する原子力発電所

Nuclear Power Plant Harmonize with Global Society

原子力事業本部 松 岡 強*¹
鬼 沢 秀 夫*²

当社では、静的な設備で構成される安全系と動的な設備で構成される安全系を最適に組合せたハイブリッド安全系を導入した原子力発電プラントの開発を行っている。二つの安全系は互いにバックアップ機能を有しており、多様なシステムでプラントの安全を守るという多層の安全防護を実現している。また、発電所から発生する廃棄物の低減を図るとともに、廃棄物を安定な形に処理するための開発を行っており、安全系の開発と併せ、一層環境に調和したシステム作りを行っている。

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. is now developing the nuclear power plant introducing the hybrid safety system which combine the safety systems consist of passive equipments and systems consist of active equipments. Both systems have support function each other, and it realize the defence in depth which protect plant safety by diverse system. We are making the system which harmonize with the environment still more by these development.

1. ま え が き

ウランの核分裂エネルギーを利用した原子力発電は、化石燃料の燃焼を利用したエネルギーとは異なり、二酸化炭素の放出がなく、またエネルギー当たりの廃棄物量も格段に少ないため、地球への環境影響が少ないという特長を有しており、地球社会と共生できるエネルギーと言える。21世紀に向け原子力発電を今後さらに人類にとって安定なエネルギー供給源としていくためには、原子力発電所から周辺公衆に影響を及ぼすような放射性物質の放出を伴う事故が発生しないように“安全の確保”に万全を期すことが大前提であることは言うまでもない。

本報では、事故が生じないための、また万一生じてもそれが拡大しないための安全性向上の研究及び通常の運転時に発電所から発生する放射性廃棄物の低減・処理に関する研究についてその一端を紹介したい。

2. 安全性向上研究

2.1 ハイブリッド安全系

原子力発電所では事故を起こさないように設計・製作面及び運転・保守面において細心の注意を払っている。さらに万一事故が発生した場合を想定して、プラントを停止し炉心を速やかに冷却し、放射性物質の漏れがある場合にはそれを確実に閉込めることができるよう、安全系設備を設けている。現行のプラントに採用されている安全系設備はポンプ、ファン等動力の供給を受けて動く動的機器を主体に構成され、強制的に冷却水を炉心に注入すること等によって機能を達成できる設計になっており、十分な信頼性を有している。

しかし、視点を変えるとこれらの設備を運転するためには、非常用ディーゼル発電機等の電源設備、補機冷却水系や海水系等の冷却水設備及び空調設備など多くの補助設備のシリーズ運転が必要となり、全体としてシステムが複雑化する傾向にある。

この複雑化の改善、及び原子力プラントの更なる安全性向上のために、最近、国内外で次世代原子力プラントの安全系設備の候補として、重力・自然対流等の自然の力だけを用いた静的安全系設備の検討が行われている。これは従来の動的な安全系設備に比べ、

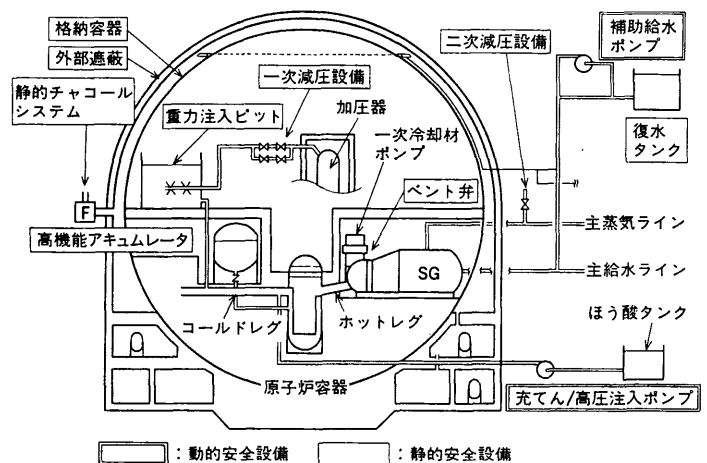


図1 ハイブリッド安全系の構成
Configuration of hybrid safety systems

運転員の負担軽減が図れるとともに設備簡素化や信頼性向上等の可能性もある画期的な概念である。当社では下記に示す当社独自の静的安全系設備を導入して従来の動的な安全系との最適組合せを図ったハイブリッド安全系を開発している。

- (1) 高機能アキュムレータ
- (2) 横型蒸気発生器を利用した静的冷却方式

図1にハイブリッド安全系の構成を示す。

2.2 高機能アキュムレータ

現行プラントでは万一事故が発生した場合を想定し炉心へ冷却水を注入する設備を設置している。具体的には早期に大量の冷却水をアキュムレータを用いて注入し、その後炉心で発生する崩壊熱を除去するためには小流量の低圧注入ポンプを用いている。

新設計機種である高機能アキュムレータは、渦巻ダンパ等で良く知られている Fluidics（流体素子）を利用して、流量を静的に切替えることができるもので、現行のアキュムレータ機能と低圧注入ポンプ機能を一つの設備のみで達成したものである。

図2は高機能アキュムレータの原理を示している。従来型のアキュムレータの出口に、渦を利用して流量の切替えが行える渦巻ダンパを設置したものである。アキュムレータ水位が大流量注入

*1 原子力技術センター 軽水炉技術部長

*2 原子力技術センター 原子燃料・燃料サイクル技術部長

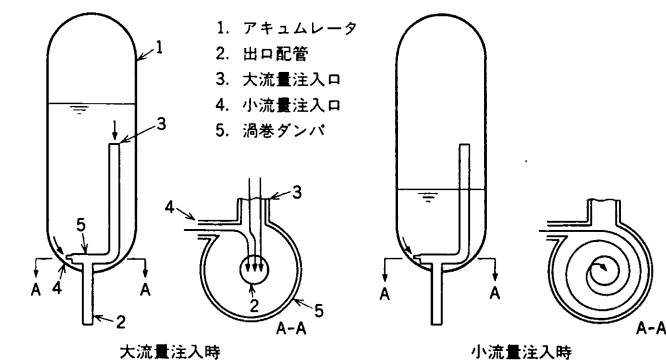


図2 高機能アキュムレータ
Advanced accumulator

口より上にあるときは大流量注入口、小流量注入口の二つの注入口から水が渦巻ダンパに入り、スムーズな流れとなって大流量が放出される。水位が大流量注入口以下となると、渦巻ダンパへ接線方向に設けられている小流量注入口だけから水が注入され、渦巻ダンパで生じる渦で抵抗が大きくなり流量が減少する。このように動的機器を用いず、単純で静的な構造で流量切替を行うことができるところが特長である。

この高機能アキュムレータの性能を確認するために、1/3スケールの実圧試験を実施し、所定の性能が得られることを確認した。

2.3 横型蒸気発生器を利用した静的冷却方式

現行プラントでは、アキュムレータによる冷却水の注入が終了した後 高圧注入ポンプにより燃料取替用水タンクの水を炉心へ注入し、その後格納容器の最下層部に設置しているサンプに取水源を切替えて余熱除去冷却器、ポンプ等を用い長期にわたる炉心冷却を行う設計としている。

ハイブリッド安全系で採用している静的冷却方式では、前述の高機能アキュムレータによる冷却水の注入が終了した後、長期にわたる一次冷却材系内の自然循環により蒸気発生器 (SG) を用いて炉心崩壊熱を除去する設計としている。

炉心崩壊熱は図3に示すように最終的には SG 伝熱管を介して、一次系から二次系へ伝わり、復水タンクから重力で SG 二次側へ注入された水を沸騰させ主蒸気逃がし弁から蒸気として放出する。一次冷却材中の非凝縮性ガスが SG 伝熱管等に蓄積して、自然循環を阻害することがないように SG を横型とし、伝熱管部にたまる非凝縮性ガスを水室部のベント管から除去する設計としている。非凝縮性ガスのベントシステムの性能確認、自然循環量の把握、SG 除熱量の確認及び安全解析コードの検証をするための事故時

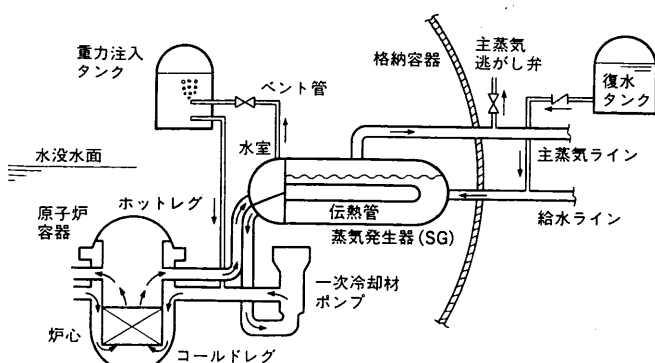


図3 横型蒸気発生器利用静的冷却方式
Passive cooling system with horizontal steam generator

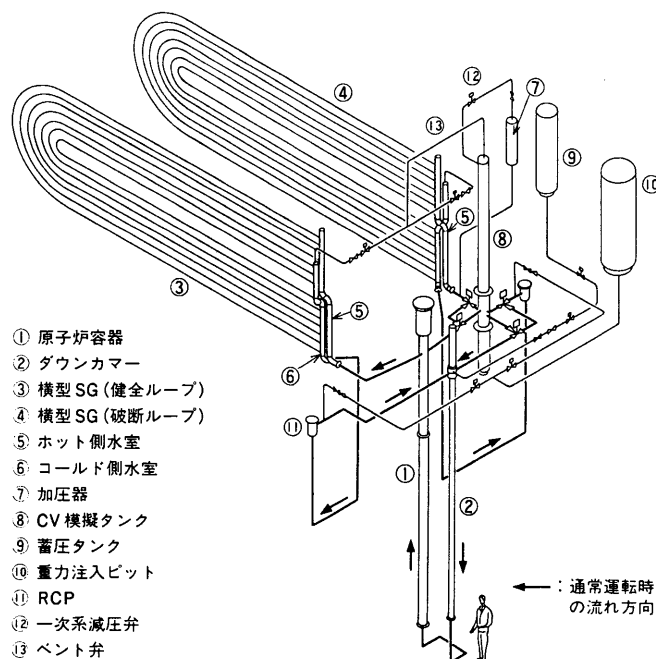


図4 事故時総合熱流動試験装置鳥観図
Thermal hydraulic test facility

熱流動挙動に関する総合熱流動試験を実施している。図4に事故時総合熱流動試験装置の鳥観図を示す。

2.4 ハイブリッド安全系の特長

ハイブリッド安全系では比較的頻度の高い事象に対しては事故収束・拡大防止能力の高い従来の動的な安全系を動作させ、また非常に頻度は少ないが重大な事故 (冷却材喪失事故及び動的な安全系不作動事象) に対しては、ここで紹介したシンプルな静的な安全系で事故収束を行っている。さらには、両システムは互いにバックアップ機能を有しており、従来の動的な安全系に加え、新概念の静的な安全系による多様なシステムでプラントの安全を守っている。

このようにシンプルなシステムを用いた多層の安全防護により、事故の発生防止及び拡大防止の一層の向上を図っている。さらには、大部分の安全系を常用系と共用することにより経済性向上も図っている。

3. 放射性廃棄物の処理処分

3.1 廃棄物処理処分の動向

原子力発電所において発生する放射性廃棄物は、気体、液体、固体の3種類に大別されるが、それぞれに適した処理が行われている。すなわち気体の場合は専用の処理装置で、安全なレベル以下まで放射性物質を除去した後に大気中に、液体の場合はフィルタやイオン交換樹脂などでろ過、脱塩、蒸発濃縮して放射性物質を除去し安全を確認した上で海中へ、固体の場合は可燃性のものを燃やして容積を小さくしてドラム缶詰めにし、燃やさないものはドラム缶に密閉して、それぞれ発電所構内に保管されている。これらドラム缶の埋設処分場として青森県六ヶ所村の低レベル放射性廃棄物埋設センターが操業中である。

このように廃棄物をできるだけコンパクトにまとめ発電所構内の保管量を少なくして原子力発電所は運営されている。当社はさらに廃棄物の低減を図ることが地球環境を守り、今後の長期的なエネルギー需要の増大に対してクリーンなエネルギーの供給につながるの観点から技術開発を推進している。具体的には廃棄物そのものの発生を抑制するほう酸サイクル技術を開発中であ

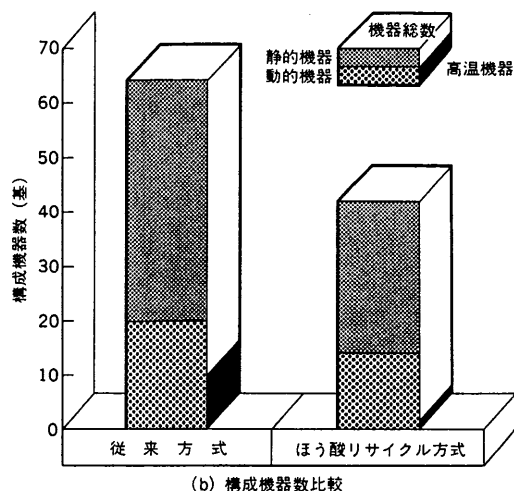
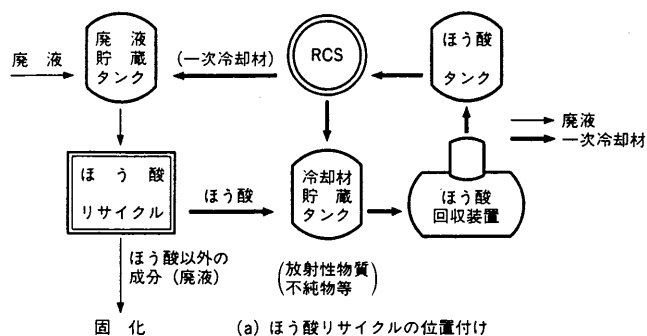


図5 ほう酸リサイクルの位置付け及び構成機器数比較
Concept of boron recycle and component number comparison

り、また従来未処理のまま保管されている廃棄物を処理し、埋設処分が可能なものに転換する使用済樹脂処理技術の開発を完了させ、実機を建設中である。

3. 2 ほう酸リサイクル

3. 2. 1 ほう酸リサイクルの位置付け

加圧水型原子力発電設備では反応度制御の一手段として一次冷却材中にはう酸を添加しているが、この一次冷却材の一部は運転に伴って各構成機器から系外に廃液として排出され、廃液貯蔵タンクに集められる。この廃液にはう酸以外に放射性物質やさまざまな不純物が含まれている。従来、この廃液はそのまま濃縮・固化処理されていたが、廃液中の主成分であるう酸は、本来廃棄物ではなく、回収・再使用可能なものである。そこで、このう酸を回収して一次冷却材に添加・再使用するとともに、放射性物質等の廃棄物の発生を最小限にとどめる方法として“ほう酸リサイクル”がある〔図5(a)〕。

3. 2. 2 ほう酸リサイクル設備の概要

ほう酸リサイクル設備は主として2種類の装置から成る。一つは限外ろ過装置で廃液を前処理して固形分や油分等を取除く機能を持つ。次に逆浸透装置を用いて、ほう酸とコバルト (Co) やセシウム (Cs) 等の溶解性の放射性物質などを除去する。

このほう酸リサイクルを適用した場合、従来廃棄していたほう酸の85%を回収するため、廃棄分は15%となり、大幅に廃棄物の発生を低減できる。廃棄するほう酸量の低減に伴い、廃液の濃縮・固化処理設備の大幅な合理化が可能となり、構成機器数

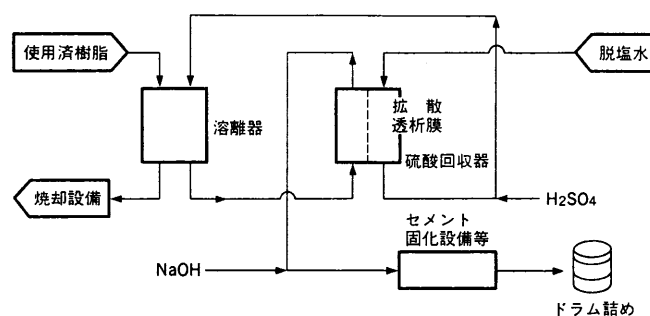


図6 使用済樹脂処理装置の概要
Outline of spent ion exchange resin treatment system

及び設備設置スペースも従来の70%程度(30%低減)となる
〔図5(b)〕。

3.3 使用濟樹脂處理

3. 3. 1 使用済樹脂処理の位置付け

一次冷却材の浄化に使用された後の使用済樹脂はこれまで発電所のタンクに貯蔵されていた。しかし、これからは発電所の運転に伴い増加する使用済樹脂をそのまま貯蔵・保管するのではなく、適切な処理により有機体から無機体に転換して埋設処分に適した安定固化体とするのが望ましい。

3. 3. 2 使用済樹脂処理装置の概要

使用済樹脂に吸着されたコバルト (Co) 等の放射性核種を希硫酸で溶離 (分離) して、放射能レベルの低くなった樹脂と核種を含む溶離液に分離する。そして樹脂は焼却により、溶離液はセメント固化により安定した無機体とする。

使用済樹脂処理装置は溶離器と硫酸回収器とその他の機器で構成される（図6）。使用済樹脂貯蔵タンクから樹脂を一定量取り出し、溶離器に充てんする。次に希硫酸を通過して核種を溶離し、溶離液は下流の硫酸回収器へ送る。硫酸回収器は拡散透析膜により硫酸を回収するもので、膜の片側（左室）に硫酸溶離液を上向流で、反対側（右室）に純水を下向流で流すと拡散透析膜を介して、溶離液中の硫酸と核種が分離される。

このシステムは動的機器も少なく、常温・常圧で操作されるため、運転・メンテナンス性に優れている。

溶離液として2 N（規定）硫酸を使用した場合、通液量が溶離器内樹脂容積の20 倍程度で樹脂の除染性能（DF）としてCo の場合約1 000 が得られている。

3. 4 新廃棄物処理方式の特徴

ほう酸のリサイクルにより、ほう酸廃棄量を従来の15%（85%回収）にまで低減可能となる。また、発電所で発生する放射能の大部分を占める使用済樹脂を無機安定固化体とすることにより、発電所の廃棄物処理をさらに推進させることになる。

4. あ と が き

原子力発電所はその核エネルギーが膨大で潜在的危険があること及び一部長寿命の放射性廃棄物が発生することにより、実体以上に危険視されがちである。しかしながら、地球にやさしいものとなるためのこれらの研究により、原子力発電の真の姿を少しでも理解していただけると幸い考える。