

放射性廃棄物減容処理技術の動向

Present Status of Radioactive Waste Volume Reduction Technique

原子力発電所から発生する放射性廃棄物の大部分はドラム缶に充填され、処分未定のため暫定的に発電所内に貯蔵されているが、発電量の増加とともに貯蔵されたドラム缶数も増加しつつあるため、その対策として諸施策が検討されてきている。

日立製作所はこれに対応して、廃棄物の発生量の低減と発生した廃棄物の減容処理技術の開発に取り組み、特に、多様な最終処分にも対応可能な状態に処理することを基本とした減容処理システムを開発した。すなわち、発生量低減策として「非助材型フィルタ」、「ドライクリーニング装置」を、減容処理方法として多種廃棄物を乾燥・ペレット化する「一元化処理技術」を確立し、ドラム缶の大幅低減が可能となった。本稿ではこれらを中心に、内外動向と日立製作所の新技術について述べる。

雨宮 滋* Shigeru Amamiya
堀内 進* Susumu Horiuchi
遊佐英夫** Hideo Yusa

1 処理・処分技術の概要

1.1 処理・処分技術の背景

BWR(沸騰水型原子力発電設備)で発生する放射性廃棄物は、気体・液体・固体の形態及びその性状に応じて処理、処分されている。現状及び改良型プラント用の廃棄物処理・処分技術の概要を、図1に示す。

我が国にBWRプラントが導入され十余年が経過しているが、この間廃棄物の処理技術は処分技術と表裏一体の関係で、

国情やプラント運転経験に基づいて進展してきている。処理・処分技術進展の背景となる主要事項をまとめると下記となる。

(1) 放出放射能低減

BWR導入当初、原子力の環境対策が大きくクローズアップされ、原子力発電設備から環境に放出される放射能を実現可能なレベルまで下げる(ALAP)という観点から、主に気体・液体廃棄物について、放射能濃度低減・放出量低減の方針に

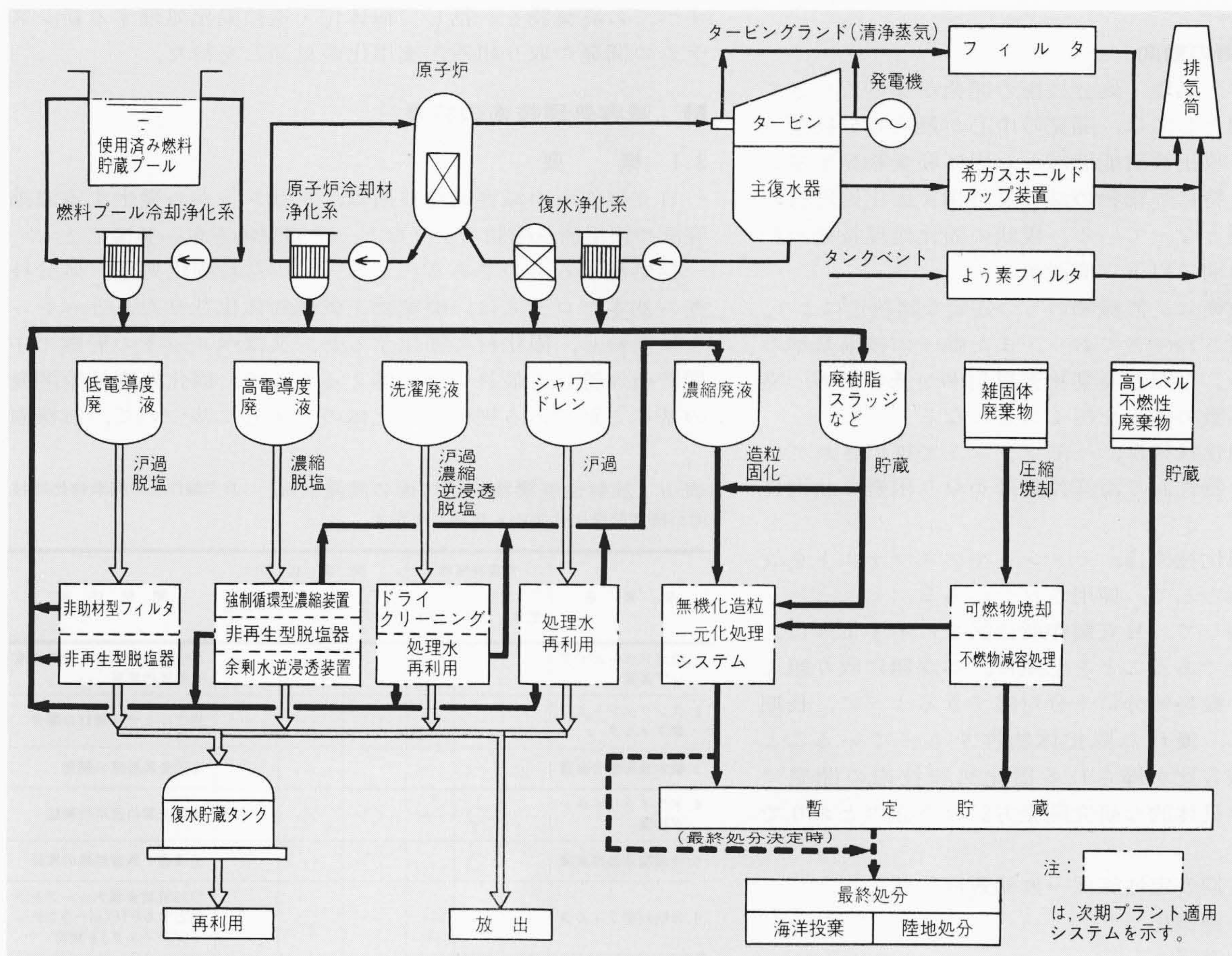


図1 BWRプラント放射性廃棄物処理方法 廃棄物は、気体・液体・固体別に性状に応じて分離し、処理、処分されている。放出放射能低減と、廃棄物充填ドラム缶低減を目指す次期プラント用ラドシステムの概要を示す。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所エネルギー研究所 工学博士

沿って、処理技術の開発・改善が進められてきた。その具体例は下記のとおりである。

- (a) 排ガス処理系への希ガスホールドアップ装置の採用
- (b) タービンブランドの清浄蒸気軸封の採用
- (c) 廃棄物処理系タンクベントよう素除去装置の採用
- (d) 高電導度廃液(床ドレン)の放出の低減
- (e) 洗濯廃液処理装置の採用

(2) 固体廃棄物(廃棄物充填ドラム缶)発生量低減

放射性廃棄物の最終処分のためには、ドラム缶などの容器内に安定に固定化する必要があり、この固体廃棄物(以下、廃棄物充填ドラム缶と称する。)の処分について、現在我が国では海洋投棄と陸地処分の両面から検討が進められているが、当面は発電所施設内での廃棄物の暫定貯蔵が必要と考えられ、将来の最終処分も考慮して、廃棄物充填ドラム缶発生量低減のニーズが高まっている。これにこたえるため、廃棄物の発生量を低減すること、発生した廃棄物を最終処分技術に適応可能な状態に処理することの二方針に沿って、処理・処分技術開発が展開されてきている。具体例は下記のとおりである。

- (a) 廃棄物発生量の低減
 - (i) 低電導度廃液汙過処理への非助材型フィルタの採用
 - (ii) 廃液脱塩処理への二塔直列形脱塩装置の採用
 - (iii) 洗濯設備へのドライクリーニング装置の採用
- (b) 発生廃棄物の減要
 - (i) 最終処分技術に適応可能な減容固化処理技術の採用
 - (ii) 可燃性雑固体廃棄物の焼却技術の採用

以上述べた事項のほかに、運転性・信頼性・保守性・安全性の向上、被曝低減などの観点から、諸設備の改良が図られている。

1.2 処理・処分技術の動向

前述の背景の下に、処理・処分技術の開発がなされてきているが、最近の動向としては、開発の中心が最終処分技術の進捗とあいまって、放出放射能低減から固体廃棄物発生量低減に移行しており、特に廃棄物の減容を目指す固化処理技術の在り方が主要課題となっている。現状の固化処理技術の動向について、固化材別に以下に概説する。

- (1) セメント固化技術は、無機物のもつ安定な諸物性により、我が国で今まで多用されてきており、また唯一の技術基準の定まった方法である。ただし廃棄物充填効率が高いため、廃棄物充填ドラム缶本数の増大を招くことになる。
- (2) アスファルト固化技術は、一部プラントで採用されているが、生成固化体の物性面で海洋投棄はかなり困難な状況にある。
- (3) プラスチック固化技術は、セメントやアスファルトを改良する減容固化技術として、採用されつつある。

固化処理技術に関して、日立製作所は図2に示すように、最終処分とは不可分であることを念頭に、本課題に取り組んでいる。すなわち、最終処分に十分対応できるように、長期間にわたって安定し、優れた固化体物性をもっていることを基本とし、高い減容比が得られる固化処理技術の開発に努力しており、その具体的な研究開発方針は下記のとおりである。

- (1) 固化体物性の長期安定性確保→無機質固化体
 - (a) 有機廃棄物の無機化
 - (b) 無機固化材の選定
- (2) 高減容比の確保→ペレット固化
 - (a) 乾燥粉体化及び造粒プロセスによる減容
 - (b) 安定造粒体による最終処分への柔軟な対応

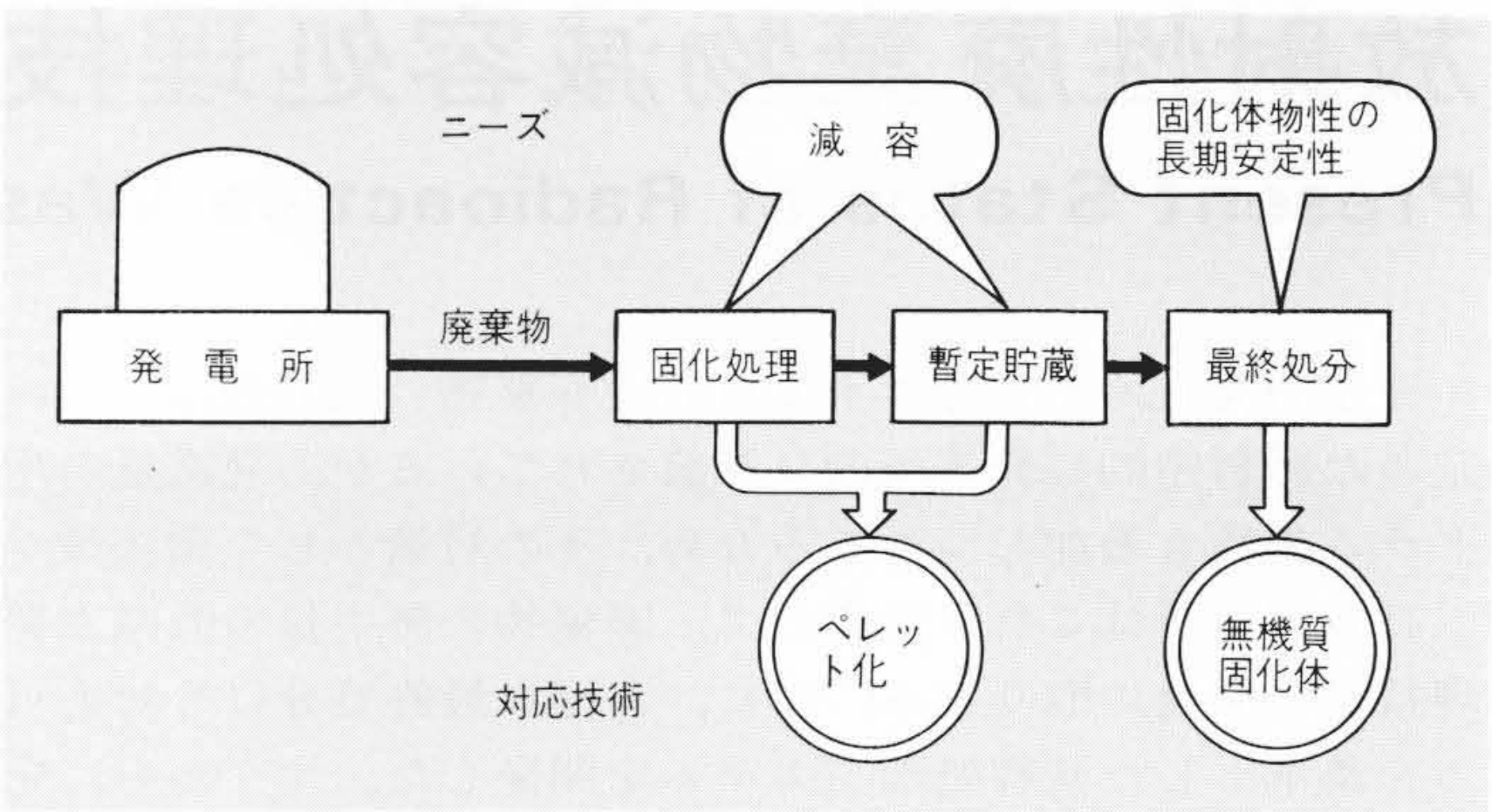


図2 固化処理技術の考え方 廃棄物は最終処分のためにドラム缶などで固定化される。この固化処理技術に要求される「減容」と「固化体物性の長期安全性」に対し、ペレット固化した無機質固化体が日立製作所の基本的な考え方である。

2 処理技術開発の推移と現状

廃棄物処理技術の開発は前章で述べたように、放出放射能低減と廃棄物充填ドラム缶低減の二つの観点から進められてきた。日立製作所の廃棄物処理の研究開発状況を、表1に要約して示す。

商用発電炉導入初期には、日立製作所は原子力の環境対策への対応として、特に気体廃棄物の放出放射能低減化の開発に力を入れ、希ガスホールドアップ装置などを実用化した。

その後、発電炉の設置基数の増加に伴い廃棄物低減化の開発を進めてきた。特に固化処理技術に関しては、最終処分対応と減容を念頭に、プラントから発生する廃液、スラリなどすべての廃棄物を一括して粉体化・造粒固化処理する新システムの開発に取り組み、実用化の見通しを得た。

3 減容処理技術の特長

3.1 概要

日立製作所の減容処理技術は、プラントから発生する濃縮廃液や使用済み樹脂スラリなど、全廃棄物を単一装置によって一括処理するものである。この一元化造粒固化処理・処分技術の基本プロセスは、廃棄物を乾燥粉体化させたあとペレットに造粒し、固化材で固化するか、又はペレットの形態で中間貯蔵保管し、最終処分に備えるもので、固化処理技術開発の基本方針である無機質固化体の考え方に基づいて、無機固

表1 放射性廃棄物処理技術の開発状況 日立製作所の廃棄物処理技術の研究開発の代表例を要約して示す。

装置名	対象廃棄物			開発目的			開発内容
	気体	液体	固体	放出低減	廃棄物低減	信頼性向上	
1.希ガスホールドアップ装置	○	—	—	○	—	—	活性炭吸着による放射能減衰効果の実証
2.タンクベントよう素フィルタ	○	—	—	○	—	—	銀アルミナ吸着材の開発
3.酸水素再結合装置	○	—	—	—	—	○	海綿金属触媒の開発
4.ドライクリーニング装置	—	○	—	○	○	—	溶剤洗濯の適用性実証
5.洗濯廃液処理装置	—	○	—	○	—	—	逆浸透+蒸留処理の実証
6.非助材型フィルタ	—	○	—	—	○	○	SUS焼結金属チューブを汙材とするPTF(ポーフチューブフィルタ)を開発
7.濃縮装置	—	○	—	—	—	○	チタン製強制循環型濃縮装置を開発
8.ペレット化装置	—	—	○	—	○	—	遠心薄膜乾燥機などの性能把握、ペレット固化処理技術の開発

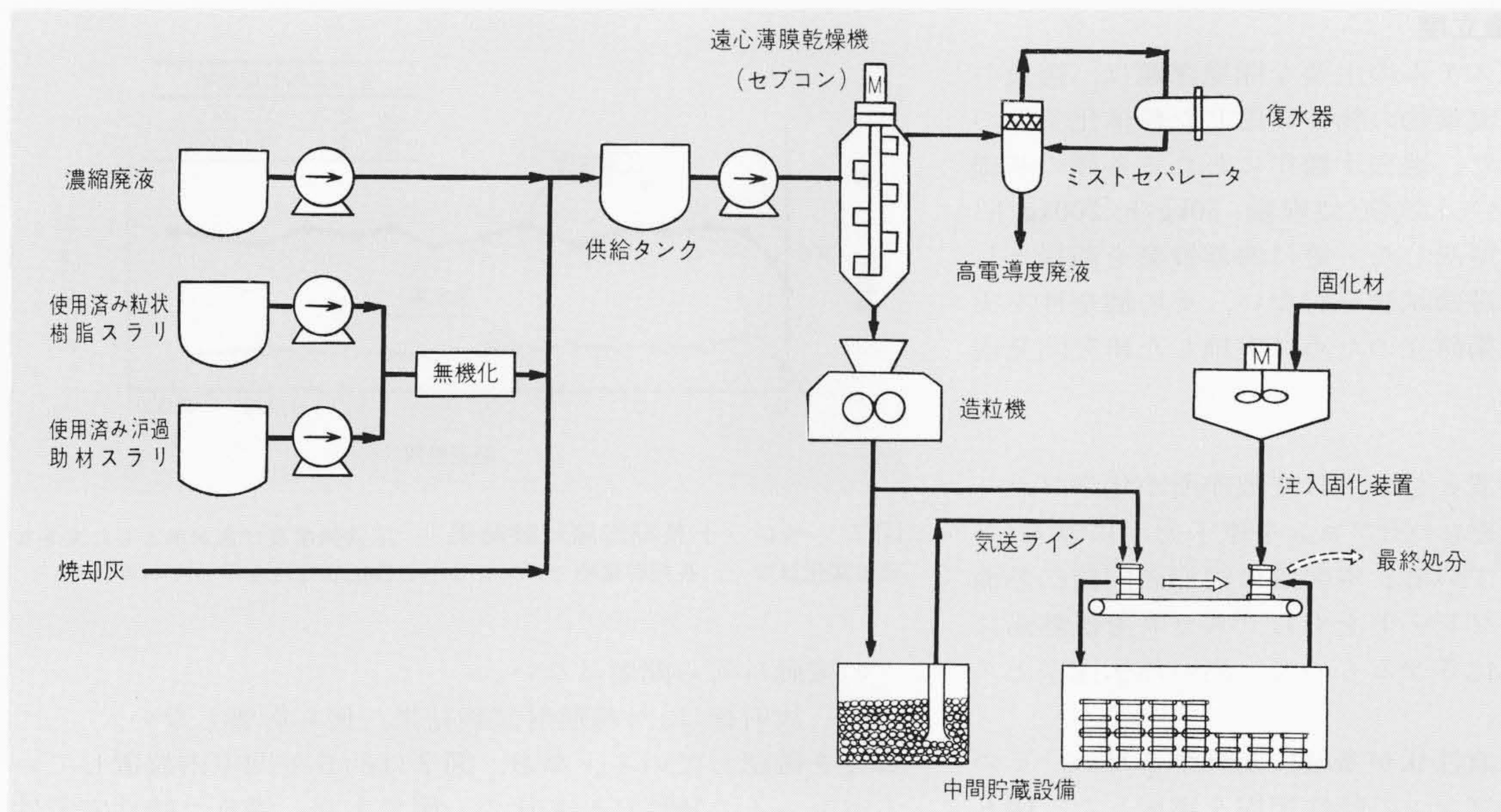


図3 一元化造粒固化処理フローシート

すべての廃棄物はセブコンと造粒機の単一システムで粉体化後ペレット化される。ペレットは最終的にはドラム缶など容器に充填され、固化材を注入して固化するが、ペレット状態、固化体いずれの形態でも中間貯蔵でき、最終処分に柔軟に対応できるプロセスである。

化材を選定するとともに、有機廃棄物の無機物転換処理も行なう。

一元化造粒固化処理システムのフローシートを図3に、減容効果と形態を図4に示す。各プロセスの概要は以下に述べるとおりである。

(1) 乾燥プロセス

各廃棄物は貯蔵タンクで必要に応じて放射能減衰を図ったのち供給タンクで混合し、遠心薄膜乾燥機(以下、セブコンと略称する。)で廃棄物中の水分を蒸発させ、乾燥粉体とする。

蒸発蒸気はミストセパレータで除染後、復水器で凝縮され凝縮水は高電導度廃液として処理される。

なお、セブコンでの粉体化処理に先だち、有機廃棄物である使用済み樹脂スラリーなどは、酸分解焼却などによって無機物に転換し更に減容効果を高めることができる。

(2) 造粒プロセス

セブコン生成粉体はブリケット造粒機でアーモンド形のペレットに成形される。

(3) 輸送・貯蔵保管・固化プロセス

成形ペレットは、ドラム缶などの容器に入れたあと固化材を注入して固化した状態、又はペレットの状態、若しくはペ

レットを容器に入れた状態で、最終処分時まで施設内に保管される。

3.2 特長

上述のペレット固化技術の主な特長は、以下の5点である。

(1) 高減容比

廃棄物充填ドラム缶発生量を、従来のセメント固化法と比較して約 $\frac{1}{5}$ に減少でき、暫定貯蔵・最終処分いずれにも極めて有利である。

(2) 実証技術の採用→信頼性向上

採用されている主要技術は、パイロットプラント(図5参照)による各種試験で技術的問題を摘出のうえ解決し、実証済みであり、構成機器は十分な信頼性を確保できるように改良設計されている。

(3) 安全性の確保

火災防止、放射能汚染拡大防止など安全対策は十分である。

(4) 最終処分対応への柔軟性

最終処分方法がどのように決定されても、技術的、経済的に容易に対応できる柔軟性をもっている。

(5) 処理能力の安定性

廃棄物の性状変動に対して、安定した処理性能を発揮する。

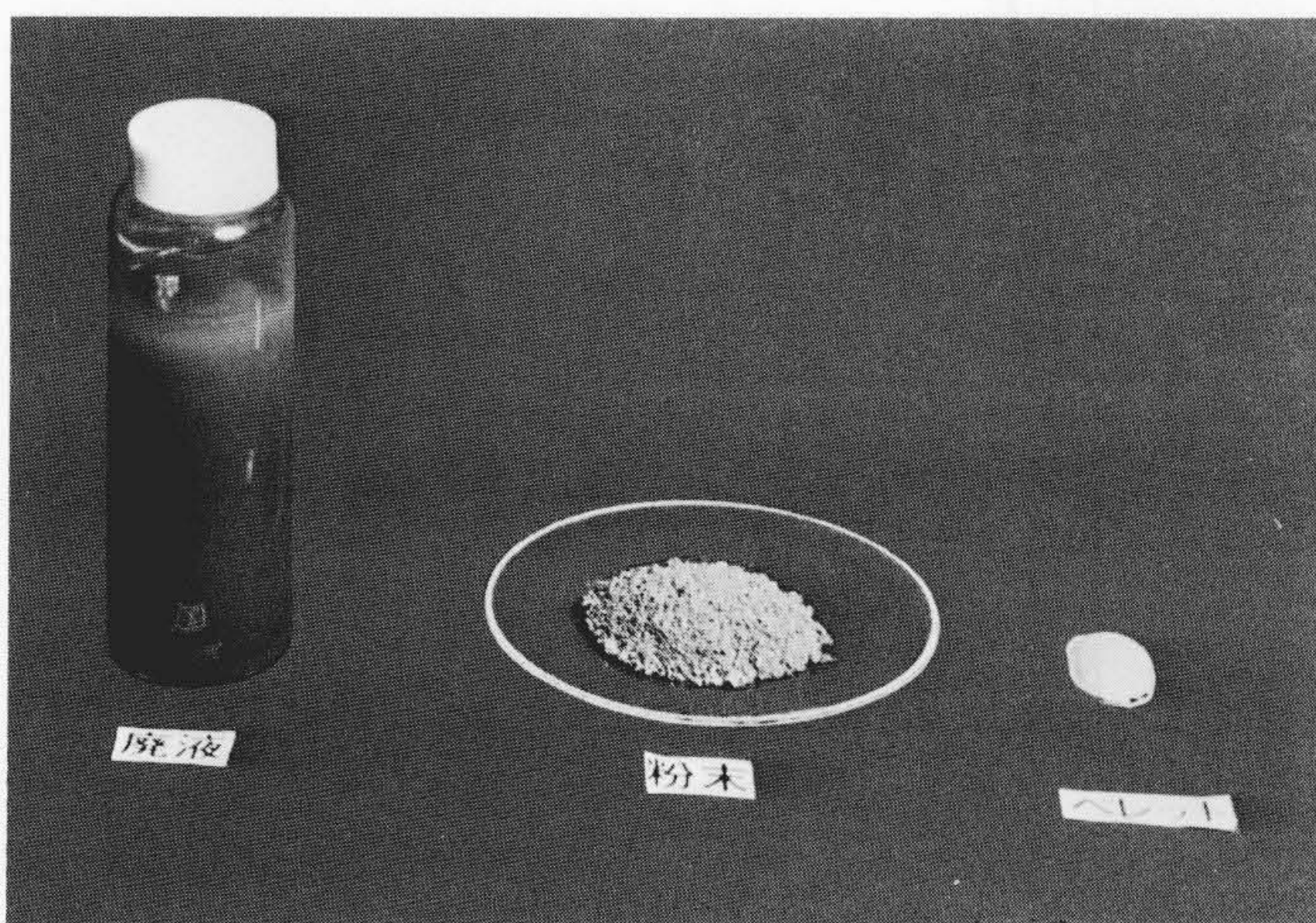


図4 一元化造粒固化処理の減容状況と形態 廃棄物はセブコンで液状(スラリー状)から乾燥粉体化され、造粒機でペレットに固められる。廃液からペレット化によって大きな減容効果が得られる。

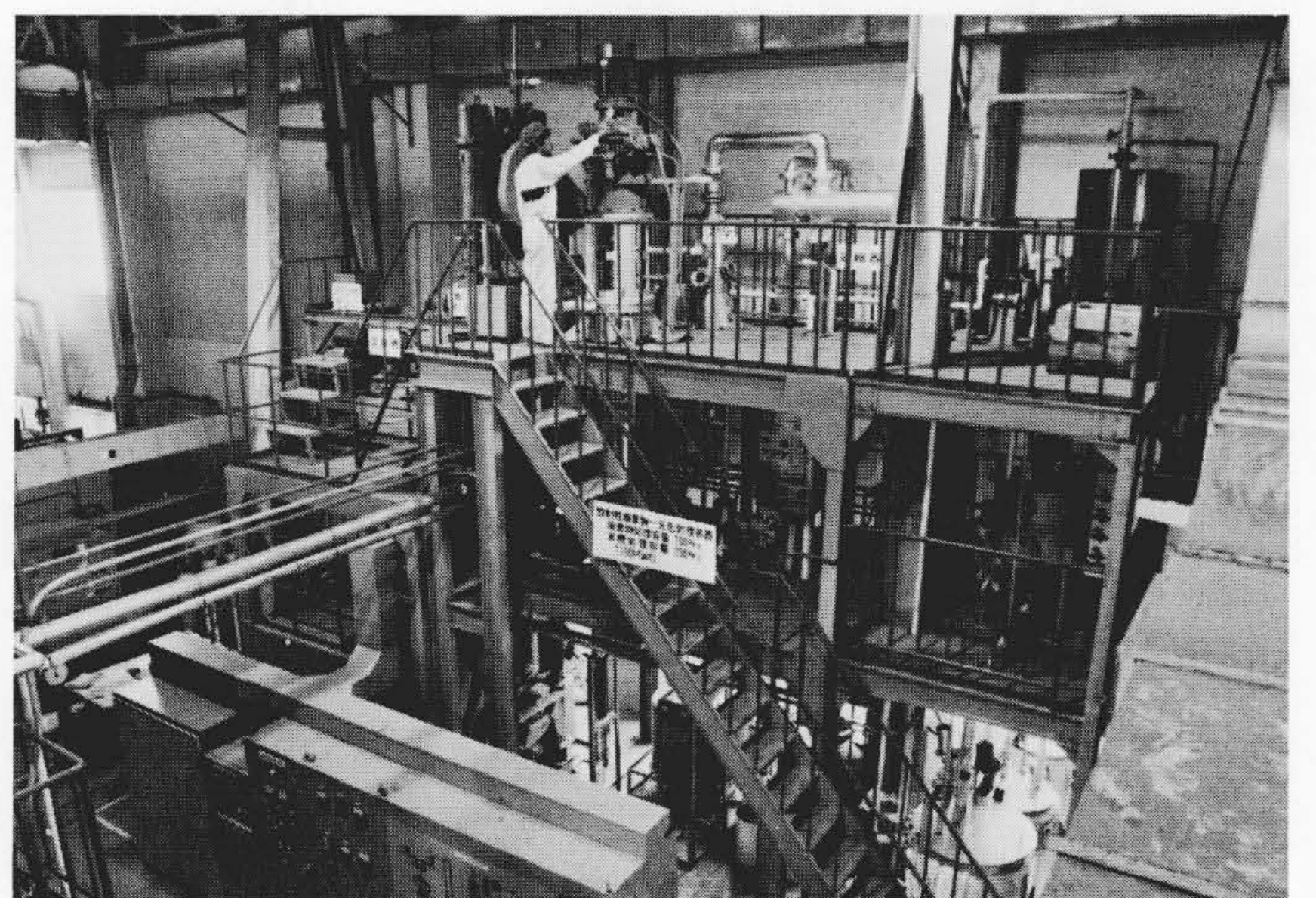


図5 一元化造粒固化処理パイロットプラント 日立製作所の一元化造粒固化処理技術は、実用規模パイロットプラントによる実証に裏付けられた高い信頼性をもつ技術である。

3.3 実機適用性と技術確立度

一元化造粒固化処理システムの主要な開発課題は、複数の廃棄物を処理するため、廃棄物の物性に応じた粉体化条件の検討とペレット化にあった。過去十数年にわたる各種の基礎的実験及びパイロットプラント試験(処理量:50kg/h, 200kg/h)により、これらの課題を解決した。更に海洋投棄を前提としたペレット固化体の各種評価試験を行ない、その健全性を実証している。実機適用技術確立のために実施した研究開発内容の一部を以下に述べる。

(1) 粉体化技術

スラリの乾燥粉体化装置として、日立製作所が化学プラントなどで多数の納入実績をもつセブコンを原子力用に導入し、種々改善を加えて適用している。本装置は縦形の円筒伝熱面に接触しながら回転するブレードをもち、スラリを伝熱面に沿って落下させ乾燥粉体化させるもので、高い熱伝達率とスケール防止が特長である。

廃棄物処理では、処理液性状が多岐に変動するため、その変動を十分考慮して、セブコンの特性把握を実施した。図6に、単独廃棄物の粉体化性能を示す。

(2) 造粒技術

各種圧縮造粒法について比較試験を行ない、最適なブリケットティング形を採用している。

粉体組成は造粒性に特に重要な因子であり、組成を広範囲に変動させた造粒試験により、強度の安定した健全なペレットを製造できる技術を確認した。なお、ペレット強度を更に向上できるバインダも開発済みである。

(3) 貯蔵技術

ペレットの中間貯蔵に備えて、ペレットの長期健全性を実証した。影響因子は湿分、温度、放射線などであるが、

(a) 湿分は、周囲雰囲気低湿度に維持することにより、長期貯蔵の上で問題はない。

(b) 湿度は、耐候促進温度サイクル試験の結果、室温範囲

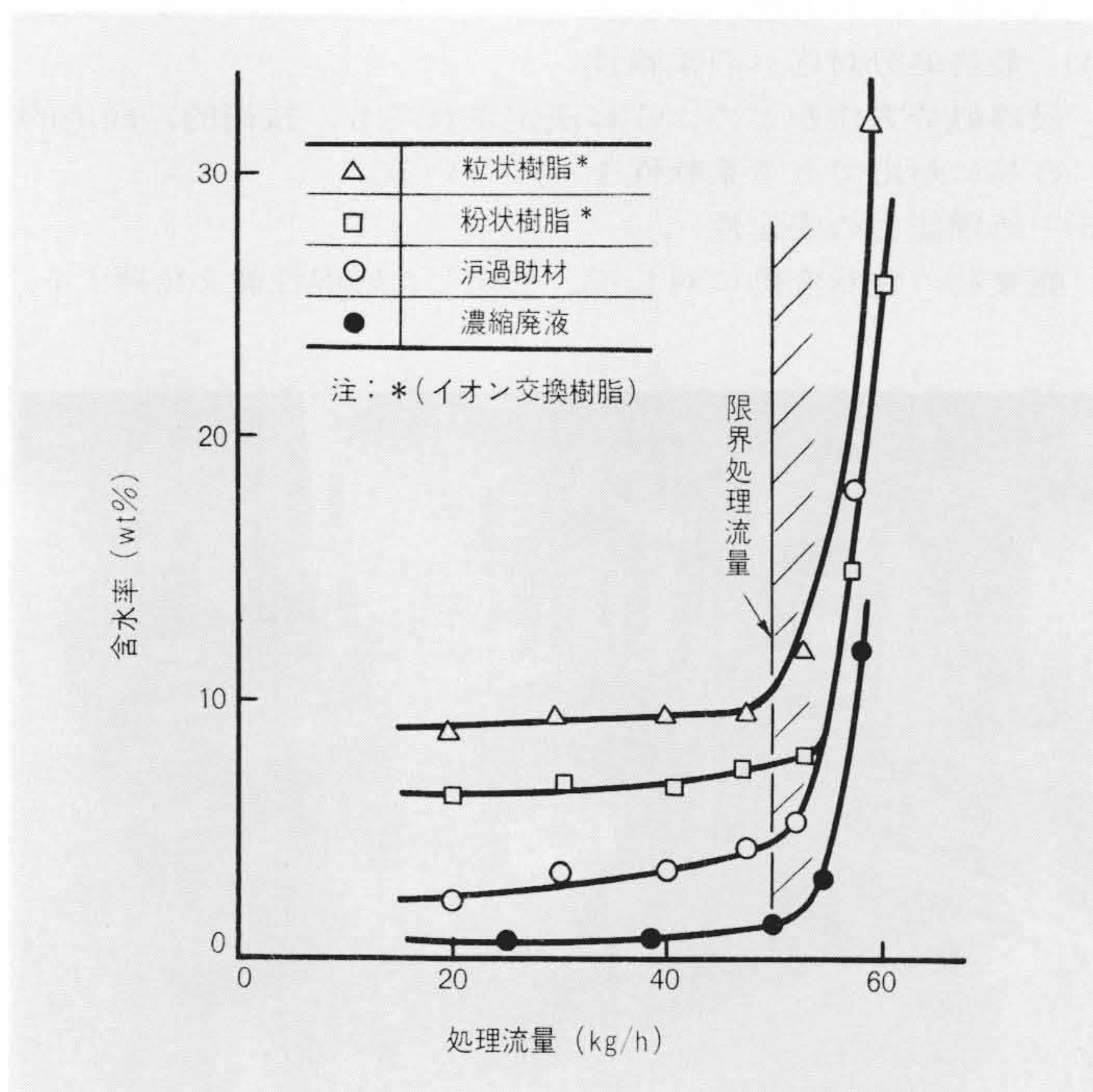


図6 単独廃棄物の粉体化性能(試験機) セブコンの粉体化性能を示す一例である。実廃液性状は多岐に変動するため、広範な組成変化に対するセブコンの粉体化性能を確認し、実機運転条件を選定している。

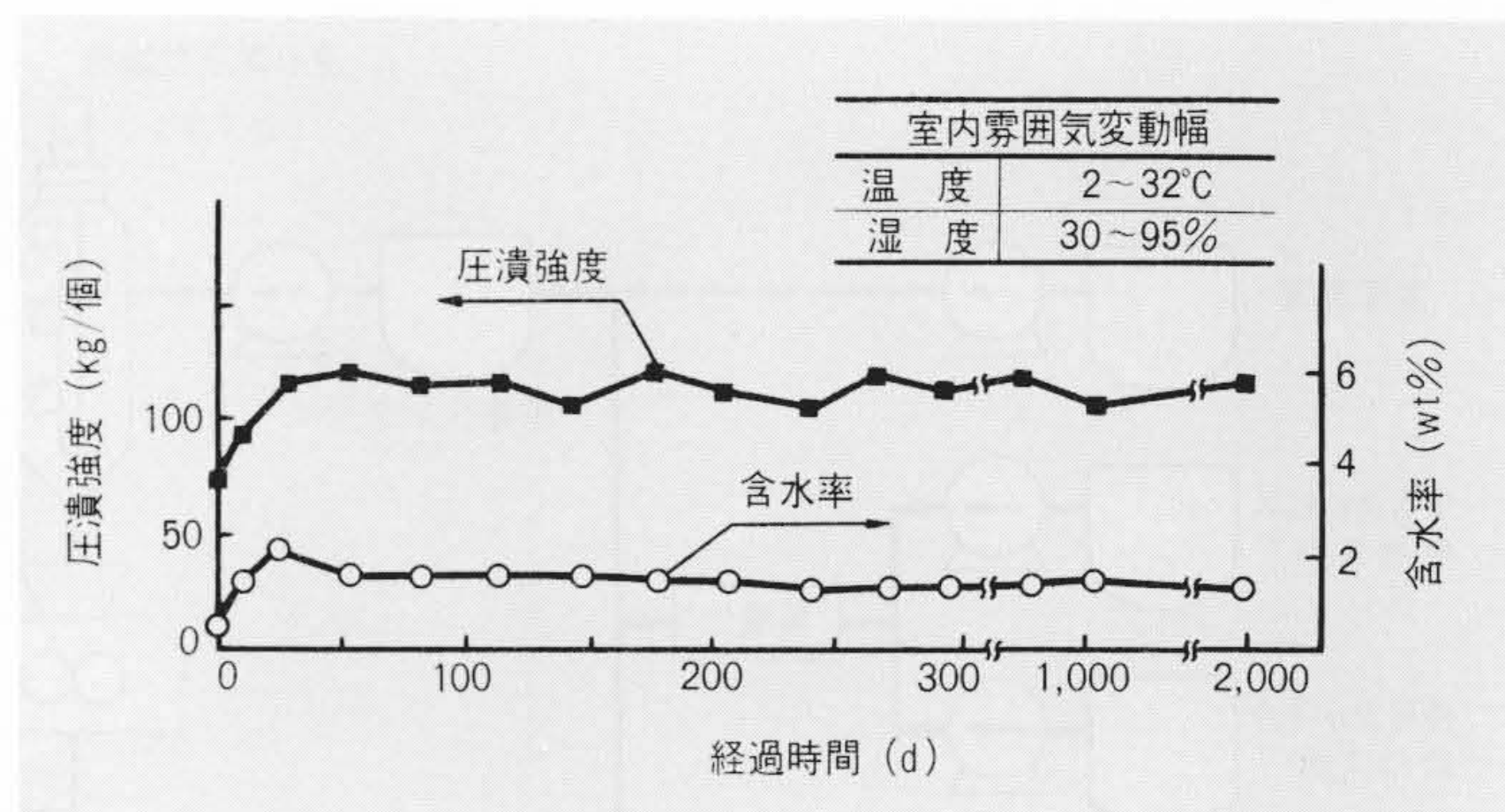


図7 ペレット長期貯蔵試験結果 圧潰強度及び含水率ともに大きな経年変化はなく、長期貯蔵時でのペレットの物性安定性を示している。

の変動は何ら問題はない。

(c) 放射線は、 γ 線照射試験結果、何ら影響しない。ことを確認している。なお、図7は約5年間室内放置しているペレットの物性経時変化の一例であり、優れた物性安定性を示している。

(4) ペレット注入固化技術

ペレット処分用固化体は、ドラム缶内に収納された内かごの中にペレットを充填したのち固化材を注入し、固化する。本固化体は、ペレットと容器との間隙に固化材層を形成するため、放射能浸出率低減、膨潤防止の観点から有利である。

ペレット注入固化体の基準化のための各種試験は、日本原子力研究所及び電力中央研究所で実施されており、処分用固化体として十分適合できることが確認されている。図8に、ペレット固化体の高圧水浸出試験結果を示す。

(5) 制御技術

ペレット固化設備の信頼性向上と省力化、被曝低減の観点から、以下に述べるような制御システムを開発し、運転の自動化を図っている。

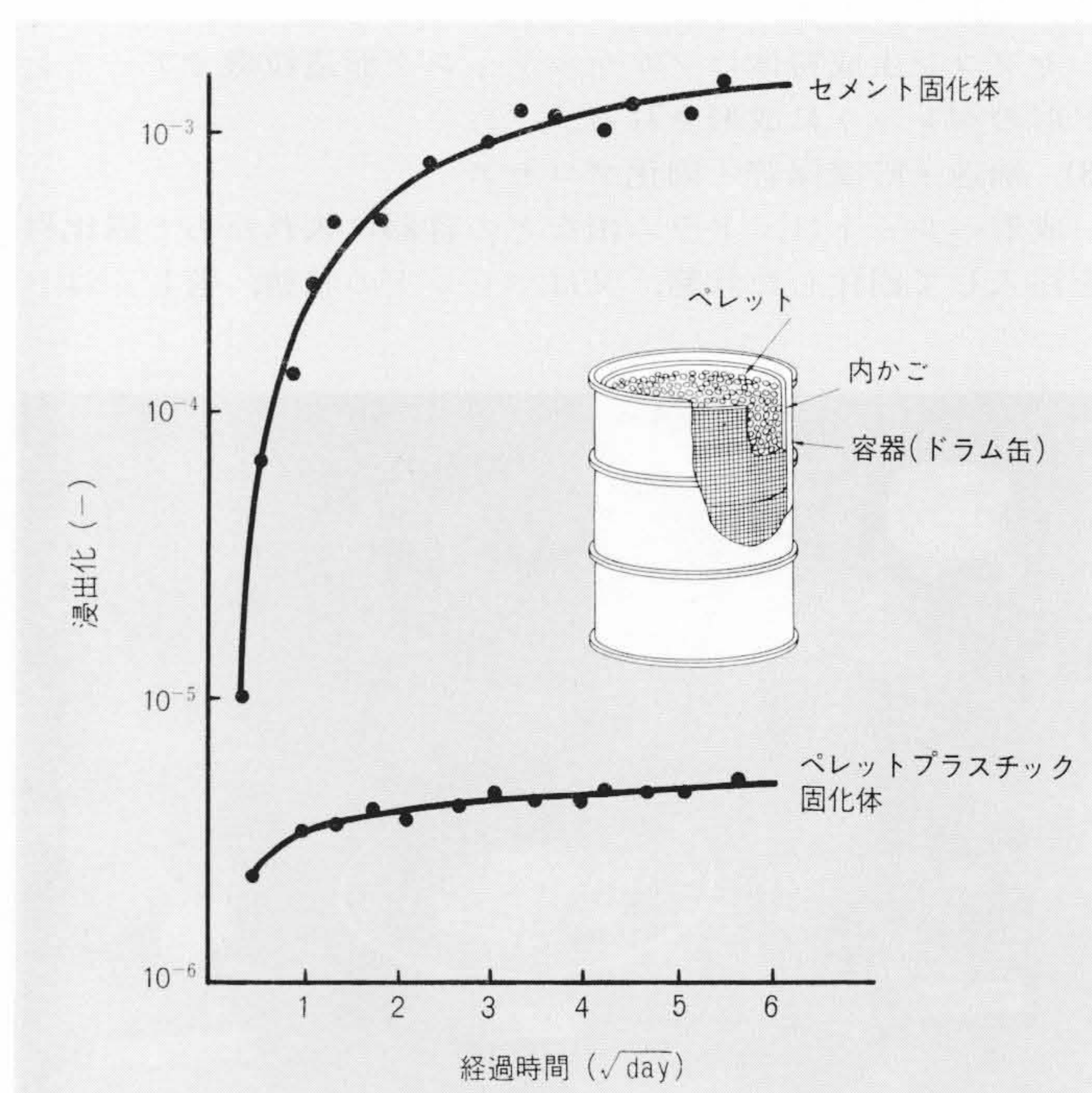


図8 ペレットの処分用固化体の構造と放射能浸出挙動 浸出比とは、全充填放射エネルギーに対する固化体外への浸出量の比である。ペレット固化体の一例として、ペレットプラスチック固化体の浸出比を示す。セメント固化に比べ格段の浸出挙動改善が得られている。



図9 監視制御装置の外観 コンソールはコンピュータを内蔵し、一連のプロセスを自動制御するとともに、プロセス動作状態を集約表示する。また、人間工学的に十分配慮した機能・形状・寸法としている。

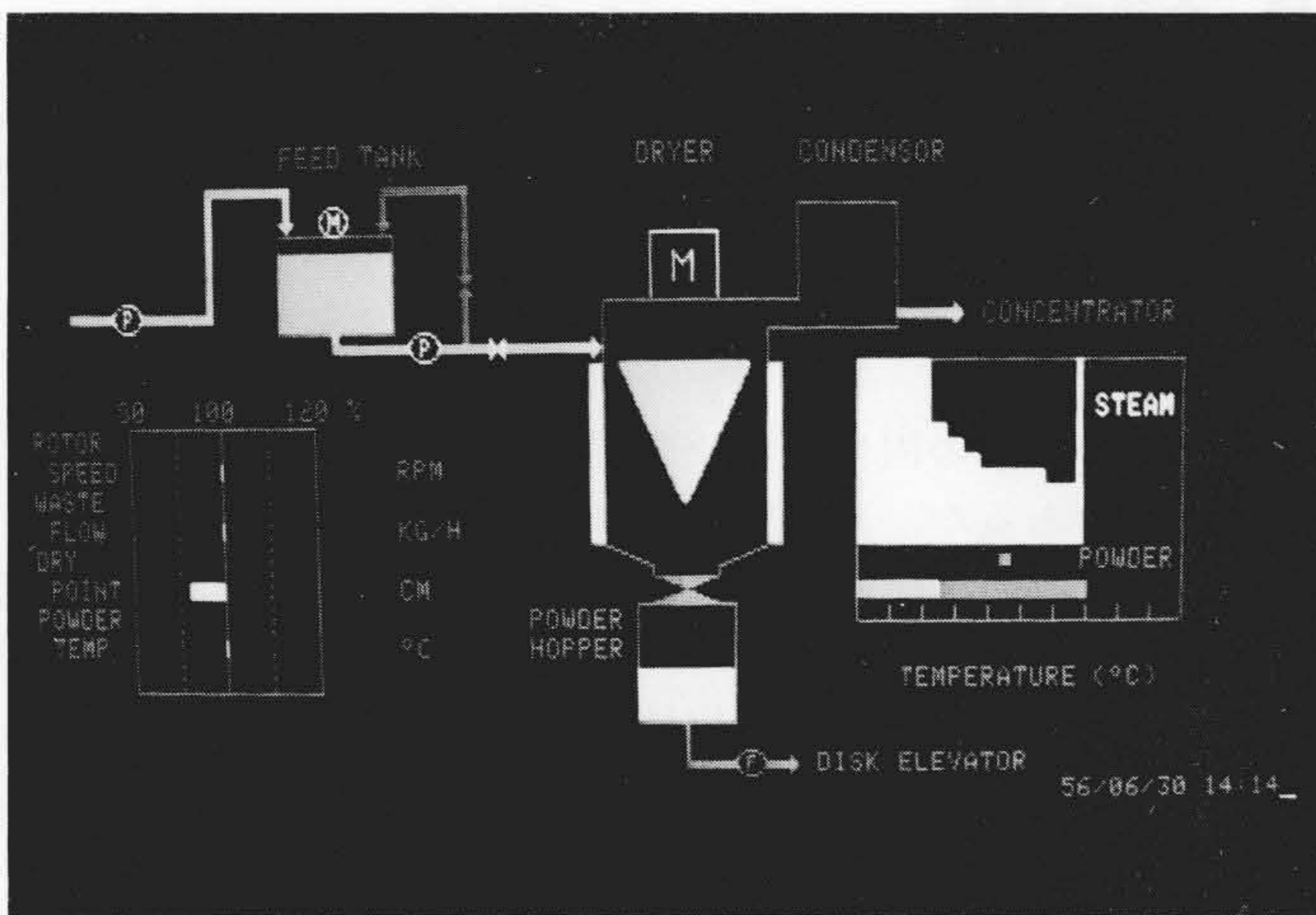


図10 CRT表示の一例 プラント運転状態、プロセス量などがカラーCRTに合理的に集約表示され、運転員の的確かつ迅速な状況把握を可能とする。

制御システムは、粉体化やペレット化などのプロセスサブコントローラと、設備全体の監視と統括制御を行なう監視制御装置から成り、階層分散化計算機制御システムにして制御の信頼性向上を図っている。また、廃棄物の混合・粉体化・造粒の各プロセスの運転をすべて自動化するとともに、主要プロセス量を監視制御装置のカラーCRT(Cathode Ray Tube)に集約表示し、運転員の負担軽減、誤操作防止を図っている。

図9に監視制御装置の外観を、図10にCRT表示の一例を示す。

4 その他の主要開発技術

その他の廃棄物低減化技術の主要なものについて、概要を以下に述べる。

(1) ドライクリーニング装置

従来、原子力発電所内で着用された作業衣などは水洗いされていたため、多量の洗濯廃液の発生をもたらしており、放出放射能低減の観点から、設備上の負担となってきた。これらの課題を解消するためドライクリーニング装置を開発し、実機プラントへの適用を計画している。なお、ランドリーシステムとしては、一部水洗い方式も併用する。日立製作所のドライクリーニング装置のフローシートを図11に示す。主な

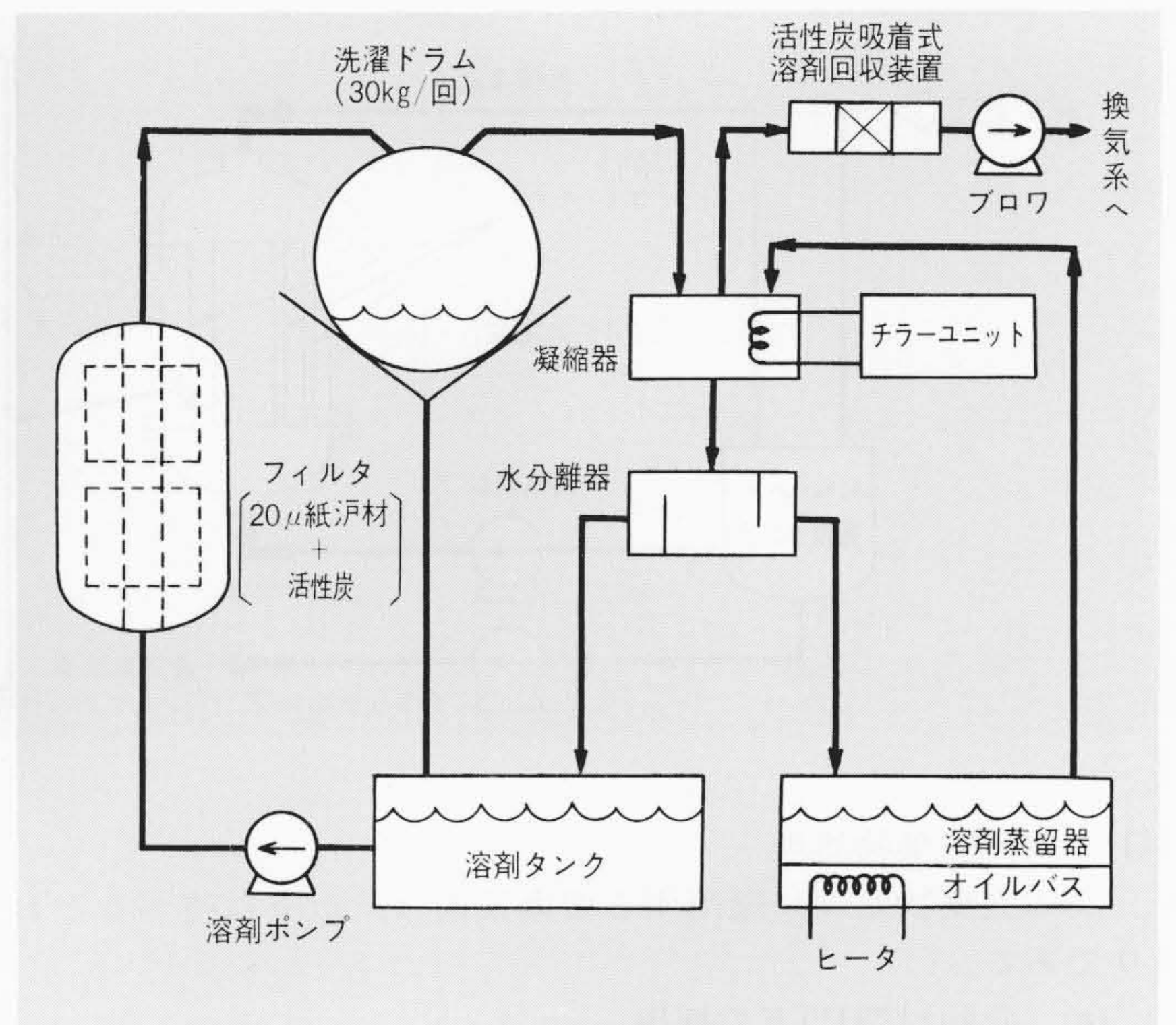


図11 ドライクリーニング装置フローシート 洗濯廃液の発生量を大幅に低減するドライクリーニング装置のフローを示す。高い除染効果と二次廃棄物低減が特長で、また、コンパクトなパッケージ設計のためスペース効率が優れ、ランニングコストが安いメリットをもっている。

特長は以下に述べるとおりである。

- (a) 溶剤の浄化は、フィルタと蒸留器を併用して行ない、洗濯中は溶剤を連続的にフィルタで浄化するため、衣服の逆汚染が防止できる(除染効果大)とともに、蒸留頻度が少なく経済的(省エネルギー)である。
- (b) 放射性物質はフィルタに濃縮され、二次廃棄物発生量が少ないとともに、取扱いが容易になる。
- (c) 装置がコンパクトでスペース効率が優れている。

(2) 非助材型フィルタ

低電導度廃液の汙過処理には、従来助材プリコート形フィルタが多く用いられてきたが、スラッジが発生し廃棄物量の増大の原因となっていた。

これに対し、様々の原理に基づく非助材型フィルタが開発適用されてきたが、日立製作所はステンレス焼結金属チューブを汙材とするPTE(ポーラスチューブフィルタ)に、特殊な自己清浄効果をもたらす方式を組み合わせで実用化した。

図12にPTFの汙過方法を示す。本PTF方式は、廃液の一部をチューブ外側に汙液として流出させ、セミバッチ式に廃液を濃縮させる方式である。マイクロポアフィルタの目詰まり防止のために、チューブ内通水流速を一定の流速に維持するとともに、間欠的に汙液を逆流させ、チューブを再生する。

(3) 耐食性廃液濃縮装置

高電導度廃液処理には、固化処理前の減容として濃縮蒸留装置が用いられているが、構造物腐食やスケリングが生じ、抜本的対策が望まれていた。これらの課題解消のために、形式、材料、運転方法などの多面的検討に基づき、チタン製強制循環形の耐食性濃縮装置を開発した。

5 次期プラント適用ラドシステム

廃棄物処理・処分技術の開発動向の主眼である廃棄物充填ドラム缶低減にこたえるための日立製作所の次期プラント適用改良形廃棄物処理システムの概要を、先の図1及び以下に示す。本システムによる廃棄物充填ドラム缶低減効果(図13)は、約4と評価される。

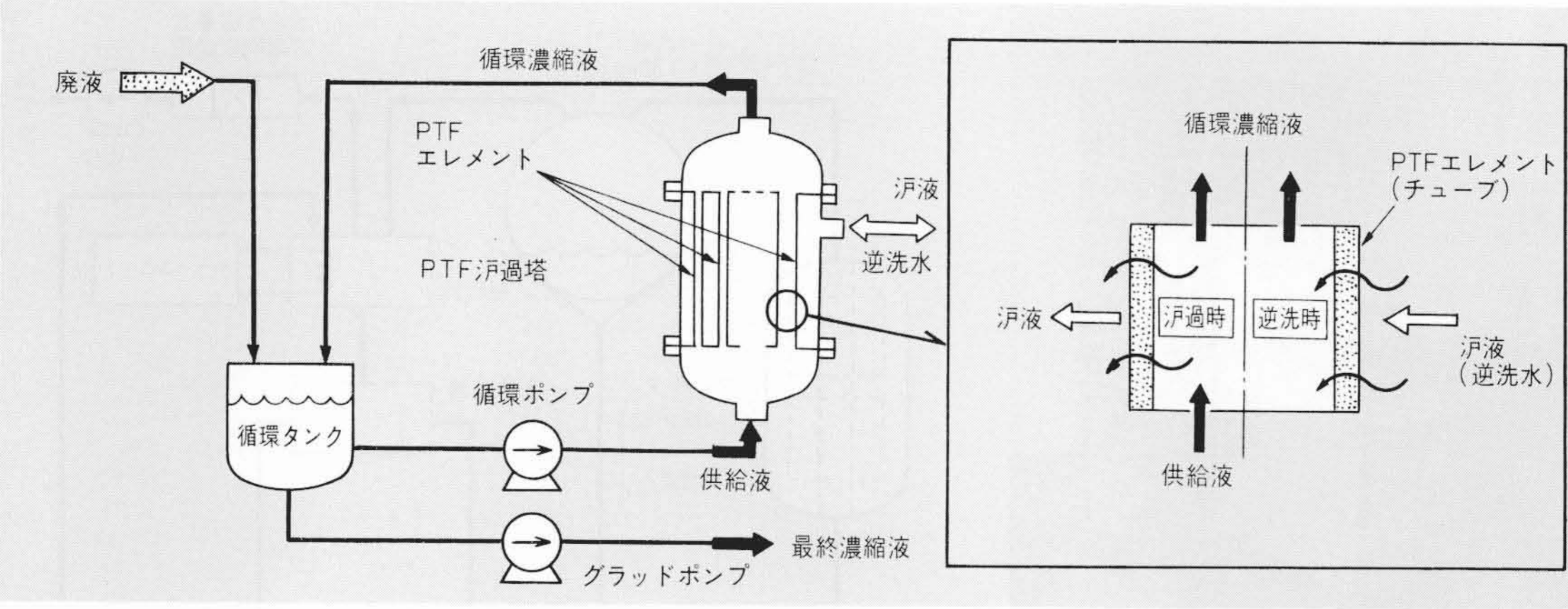


図12 PTF(ポラスチューブフィルタ)の汚過方法 ステンレス焼結金属チューブ内に廃液を循環通水し、定期的な逆洗によって目詰まりを防止している。本PTFは廃液性状変動に対して、安定かつ優れたクラッド除去性能をもっている。

- (1) 液体廃棄物処理
- 液体廃棄物処理に適用する要素技術は、以下に述べるとおりである。
- (a) 非助材型PTFの採用
 - (b) チタン製強制循環形濃縮装置の採用
 - (c) 二塔直列ラドデミの採用
 - (d) ドライクリーニングの採用
- 更にこれらのほかに、下記をオプションとしている。
- (e) 余剰水逆浸透装置
 - (f) 洗濯水・シャワー水再利用システム
- (2) 固体廃棄物処理
- 固体廃棄物処理に適用する要素技術は、以下に述べるとおりである。
- (a) 無機化造粒一元化処理システム(中間貯蔵システムをオ

- プシオンとしてもつ。)の採用
- (b) 可燃性雑固体焼却の採用
- (c) 不燃性雑固体廃棄物減容処理システムの採用

6 今後の課題

今後の廃棄物処理・処分に關する技術開発は、当面最終処分対応、とりわけ固化方式について、各種基準化動向との関連から検討が進められていくものと考えられるが、日立製作所の取組み方について以下に述べる。

- (1) 固化材の開発
- 最終処分対象の固体廃棄物の重要な要素は長期物性安定性と減容比であるが、日立製作所は、固化処理について一貫して最終処分時の環境融和性、すなわち長期物性安定性を重視する立場から、暫定対策としての造粒中間減容貯蔵システムを確立する一方、無機質固化体を基本理念として特殊ガラス固化法に着目し開発を推進している。
- (2) 固化体パッケージの開発
- 従来、処分用固化体形状はドラム缶を前提としてきたが、固化体自身の物性安定性に加え、パッケージ自体の物性改善により、最終処分時の安全性を向上させる観点からも、耐久性、減容比、取扱い性、輸送性などに関して最適なパッケージの検討、開発が必要である。
- (3) 高レベル廃棄物処理
- 使用済み制御棒、炉内計装品などの高レベル照射金属品は、現在水中に暫定貯蔵されているが、将来の廃炉廃棄物とともにこれら高レベル廃棄物に対して、法令動向に合わせて適切な処理・処分のための技術開発が必要である。
- (4) 発生廃棄物の低減

廃棄物量の低減には、減容処理のほか、廃棄物発生源側での発生量低減が必要であり、その実現のためには、今後ともプラントの水質管理を含め使用する汚過・脱塩器の運用方法、処理水の再利用方法などの検討と開発を継続して進める必要がある。

7 結 言

原子力発電所で発生する放射性廃棄物の発生量の低減と、発生した廃棄物の減容処理技術の開発について紹介した。とりわけ多種廃棄物を乾燥・ペレット化する「一元化処理技術」によってドラム缶発生本数の大幅低減が可能であり、また最終処分への柔軟な対応が可能である。

終わりに、本設備の研究開発に対し、多大な御援助をいただいた東京電力株式会社の関係各位に対し、深く謝意を表わす次第である。

廃棄物	処理フローシート (実線は従来方式 破線は新技術)	ドラム缶本数比		対応技術
濃縮廃液	床ドレン	濃縮器	セメント固化	● 脱塩器混合比変更
	再生廃液	濃縮器	乾燥機	● ペレット固化
	ランドリー	濃縮器	造粒機	● ドライクリーニング
廃樹脂	粉末	貯蔵タンク	乾燥機	● 材質改善によるクラッド低減
	粒状	貯蔵タンク	造粒機	● ペレット固化
スライラジタ	貯蔵タンク	乾燥機	造粒機	● 非助材フィルタの採用(PTF)
雑固体	可燃性	ドラム缶詰め	焼却炉	● 焼却炉
	不燃性	ドラム缶詰め	減容装置	● ペレット固化
全体平均		17	1	各廃棄物発生量の加重平均で評価

図13 廃棄物低減効果 減容の中心技術は造粒一元化処理技術であり、ドラム缶本数の大幅な低減効果が得られる。