

BWR希ガスホールドアップ装置の運転特性

Operating Performance of Charcoal Adsorber System Applied in BWR

Hitachi, Ltd. developed a rare gas hold-up device based on the results of studies with a prototype which was completed at Hitachi at the assignment by the Power Reactor Fuel Development Corporation. With official approval from the same Corporation Hitachi installed the device at the Tsuruga Nuclear Power Station, Japan Nuclear Power Generation Co. and at the Fukushima Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Co.

From experiment results obtained at these power plants, it was confirmed that by the installation of this device waste gas from nuclear reactors is noticeably deprived of its radioactivity.

下里 与* Atsu Shimozato
 竹島正毅* Masaki Takeshima
 斉藤 徹* Tôru Saitô
 遊佐英夫** Hideo Yusa

1 緒 言

BWR（沸騰水形原子炉）発電所から放出される空気抽出器系排ガスの放射能を低減させる方法として、従来採用されてきた減衰タンク方式に比べ飛躍的に減少効果の期待できる希ガスホールドアップ装置が注目を集めている。海外では、西ドイツのAEG（Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft）社がKernkraftwerke-RWE-Bayernwerk発電所に納めたものが最初であり、現在運転中であるが、この装置に関する詳細はほとんど報告されていない。

日立製作所では、動力炉核燃料開発事業団の委託のもとで、昭和43年より、その開発研究を行ない実用製品の第1号機は日本原子力発電株式会社敦賀発電所において昭和46年12月3日運転を開始した。さらに、昭和47年7月9日から、東京電力株式会社福島原子力発電所1号機において二番めの希ガスホールドアップ装置が運転にはいった。

ここでは、希ガスホールドアップ装置の原理、系統ならびに構成機器の概要および稼（か）動実績などについて述べる。

2 原 理

希ガスホールドアップ装置は、原子炉排ガスを活性炭層に通気することにより、核分裂生成ガスであるキセノン(Xe)およびクリプトン(Kr)を選択的にホールドアップし放射能の減衰を図るものである。

この場合、活性炭の特定気体に対する吸着は、物理吸着現象であり、その気体に固有な沸点に依存して沸点の高い気体ほど吸着性が強い。したがって、クリプトンおよびキセノンを含む原子炉排ガスを活性炭層に通気すると、沸点の低い窒素（沸点-195.8℃）、酸素（沸点-182.9℃）など空気成分のほとんどは、そのまま活性炭層を通過するが、高沸点のキセノン（沸点-108.1℃）およびクリプトン（沸点-153.2℃）は可逆的に活性炭に吸着され（物理吸着）、活性炭層中で吸着および脱着をくり返しながら排ガスの流れに沿って徐々に移動する。

活性炭層に上記希ガスをステップ状に導入したときの破過曲線は図1に示すとおりである。図中 t_H は流入した希ガスが活性炭層中で滞留する時間、すなわちホールドアップ時間であり近似的に次式で表わされる。

$$t_H = \frac{K \cdot M}{F} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、

- t_H ：ホールドアップ時間(h)
- K ：活性炭の動的吸着平衡定数(m³/t)
- M ：活性炭重量(t)
- F ：排ガス流量(m³/h)

一方、活性炭層入口および出口の希ガスの放射能とホールドアップ時間との間には次の関係がある。

$$\frac{A_0}{A_i} = e^{-\lambda t_H} = \frac{1}{DF} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、

- A_i ：活性炭層入口の放射能

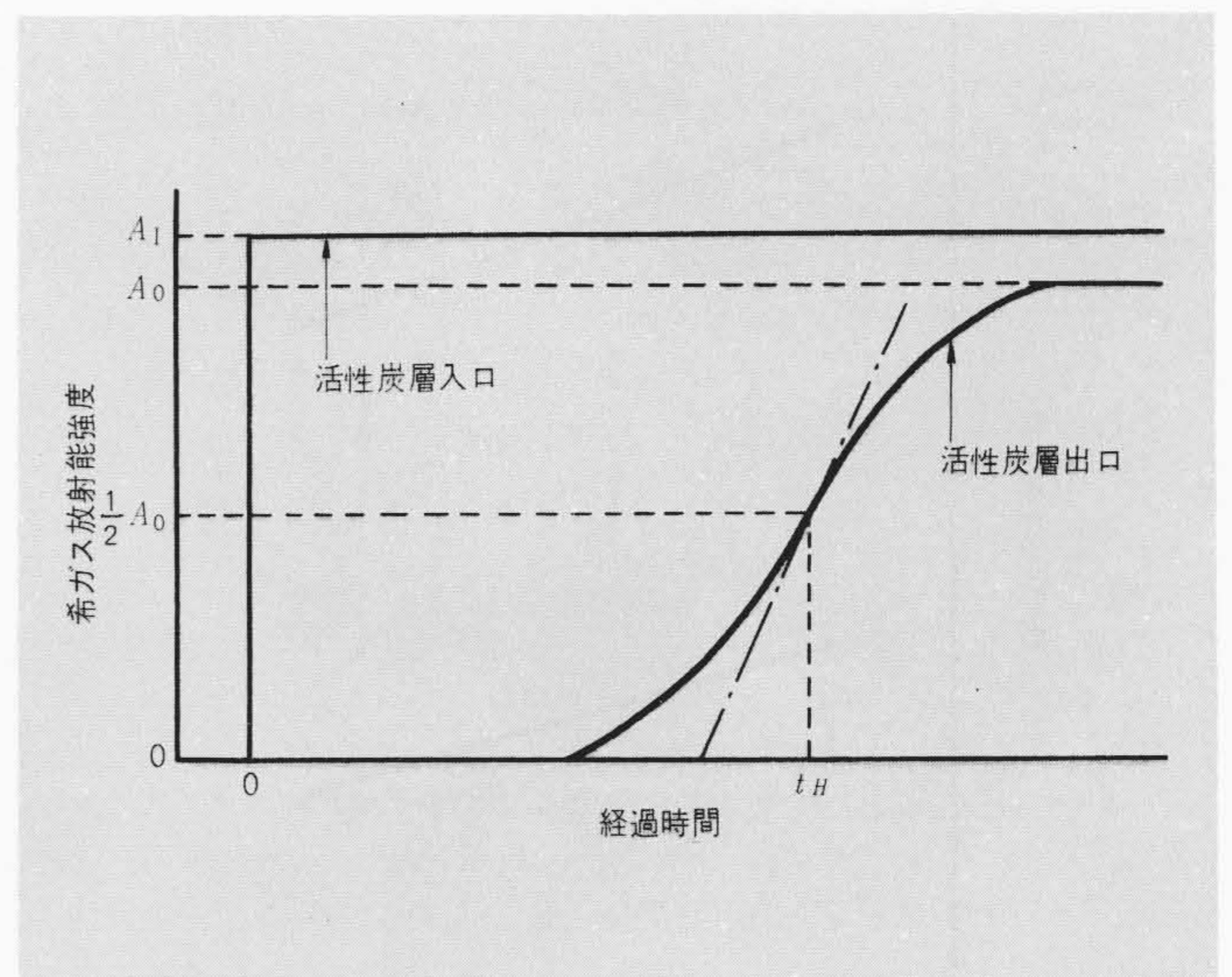


図1 ステップ状導入時の希ガス破過曲線 活性炭層入口でステップ状に希ガスを導入したときの活性炭層出口での希ガス流出曲線であり、希ガス導入後、活性炭層出口での希ガス放射能強度が定常値の1/2になるまでの時間がホールドアップ時間に相当する。

Fig. 1 Breakthrough Curve of Rare Gas through Charcoal Bed

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所日立研究所 工学博士

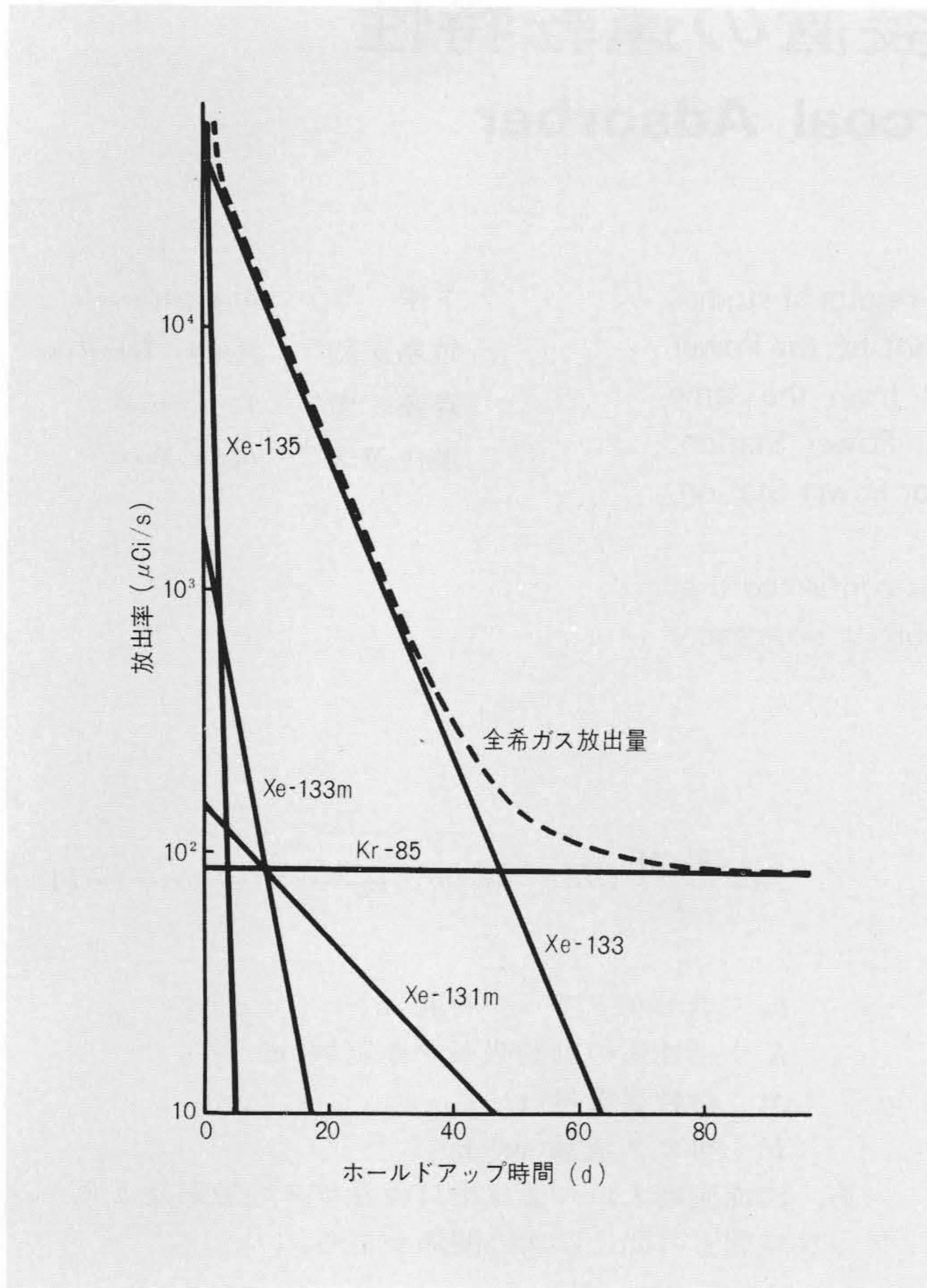


図2 ホールドアップ効果 放射性希ガスの放射能強度の減衰効果とホールドアップ時間との関係を示す。
Fig. 2 Relation between Radioactivity and Hold-up Time

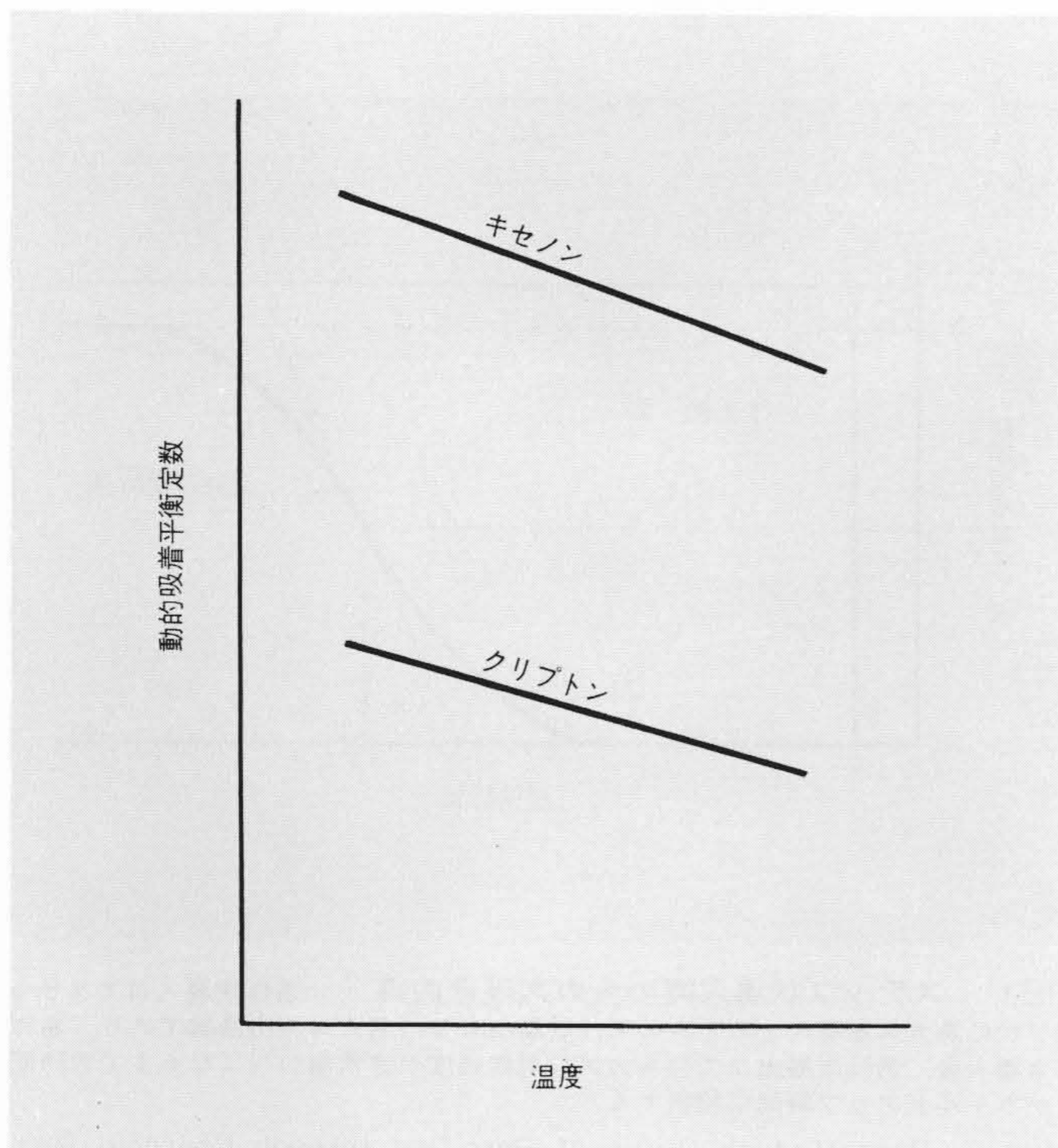


図3 動的吸着平衡定数の温度依存性 温度が低くなるほど動的吸着平衡定数は大きくなる。
Fig. 3 Effect of Temperature on Dynamic Adsorption Coefficient

A_0 : 活性炭層出口の放射能
 λ : 希ガスの崩壊定数
 DF : 除染係数

(1), (2)式より, 所定の減衰効果をうるに必要な活性炭量を算出することができる。

3 希ガス放射能の減衰効果

図2は, 各種放射性核分裂生成希ガスの放射能の減衰効果とホールドアップ時間との関係を示すものである。図より生成後10日以上経過すると, 全体の放射能の減衰曲線は, Xe-133のそれに一致し, 90日以上経過すると放射能はほとんどKr-85のみとなることがわかる。

4 活性炭の希ガス吸着特性⁽¹⁾

希ガスに対する活性炭の動的吸着平衡定数は, 活性炭の種類によって異なるが, また温度・圧力・活性炭含水率などの運転, 操作条件によっても変化する。以下, これらの動的吸着平衡定数に及ぼす影響について述べる。

(1) 温度の影響

図3は, 動的吸着平衡定数の温度依存性を示したもので, 温度が低くなるほど, 動的吸着平衡定数は大きくなる。

(2) 圧力の影響

圧力の変化により受ける動的吸着平衡定数の影響は, 図4に示すとおりであり, 低圧ほど動的吸着平衡定数は大きくなる。

(3) 活性炭含水率の影響

活性炭は含水率の増加により動的吸着平衡定数は急激に減少する。

一方, 通気ガスの相対湿度と活性炭含水率の間には図5のような関係がある。したがって, 希ガスの吸着にあたっては, 処理する排ガスをできるだけ乾燥した条件に保つことにより,

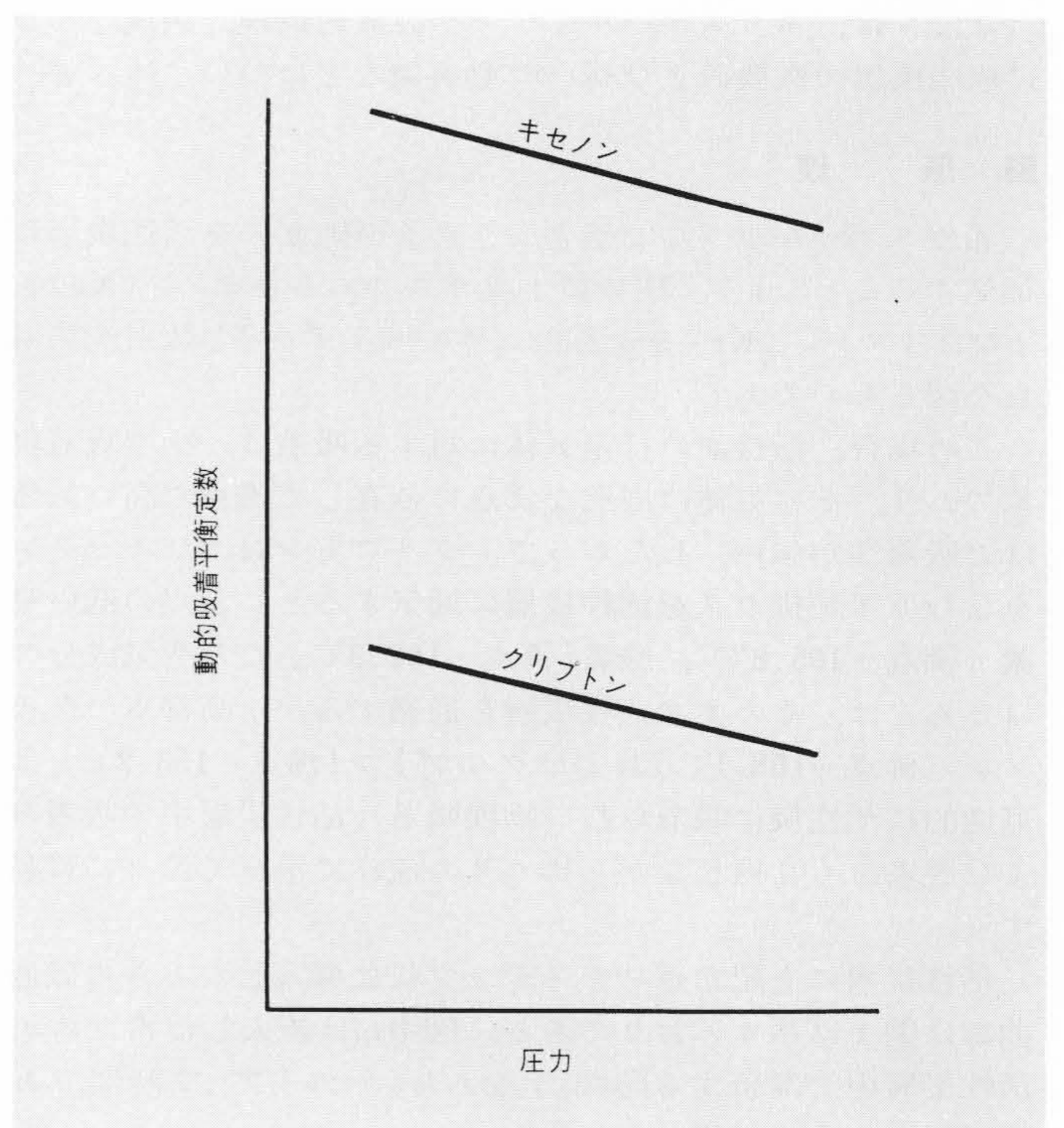


図4 動的吸着平衡定数の圧力依存性 低圧ほど動的吸着平衡定数が大きくなる。
Fig. 4 Effect of Pressure on Dynamic Adsorption Coefficient

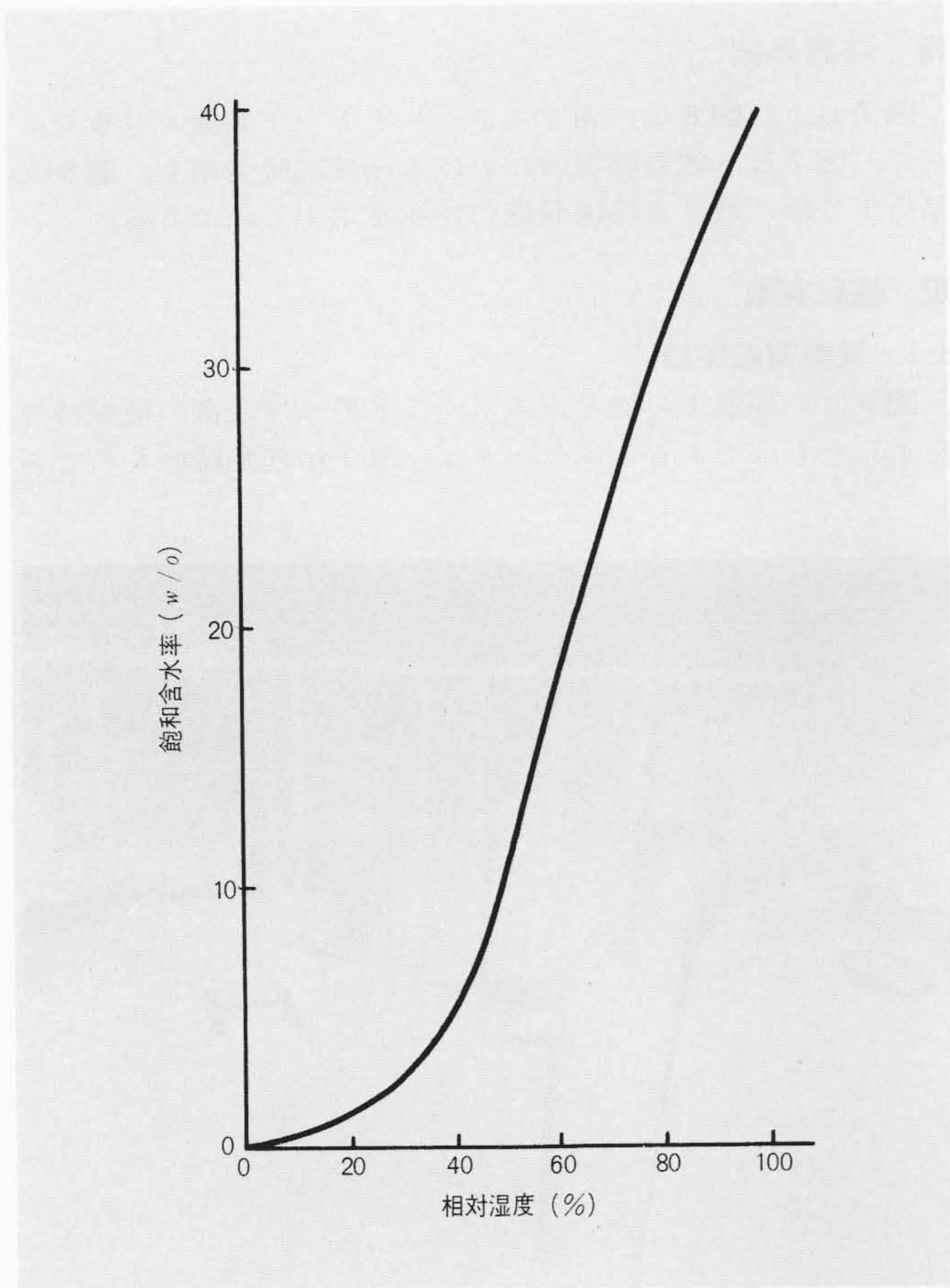


図5 通気ガスの相対湿度と活性炭の飽和含水率との関係 相対湿度の増加により活性炭含水率は上昇する。

Fig. 5 Relation between Relative Humidity and Adsorbed Water on Charcoal

活性炭の含水率を低く保つことが可能となり、効率のよい吸着効果が期待されることがわかる。

5 装置の概要

日立製作所において開発された希ガスホールドアップ装置の標準フローシートは図6に示すとおりである。本装置の構成機器は、除湿冷却器・脱湿塔・メッシュフィルタ・活性炭吸着塔・後置フィルタ・エゼクタ・脱湿塔再生設備および除湿冷却器用冷凍設備から成る。

各機器のおもな機能を以下に述べる。

- (1) 除湿冷却器
排ガスを約6°Cまで冷却し、除湿する。
- (2) 脱湿塔
除湿冷却器で大部分除湿した排ガスをモレキュラーシーブなどの脱湿剤によりさらに露点-30°C以下まで脱湿する。
- (3) 活性炭吸着塔
放射性希ガスをホールドアップすることにより、その放射能を有効に減衰させる。
- (4) 後置フィルタ
高性能粒子フィルタで、活性炭層を通過した排ガス中の放射性微粒子を除去する。
- (5) エゼクタ
系統全体を負圧に保持し、放射能の減衰した排ガスを系外へ排出する。
- (6) 脱湿塔再生設備
冷却器、加熱器、ブロワなどから構成される。水分を吸着した脱湿剤を再使用のために加熱して水分を脱着させ、冷却器において回収する。
- (7) 除湿冷却器用冷凍設備
排ガスの予備脱湿を行なう除湿冷却器に冷却用の冷媒（エチ

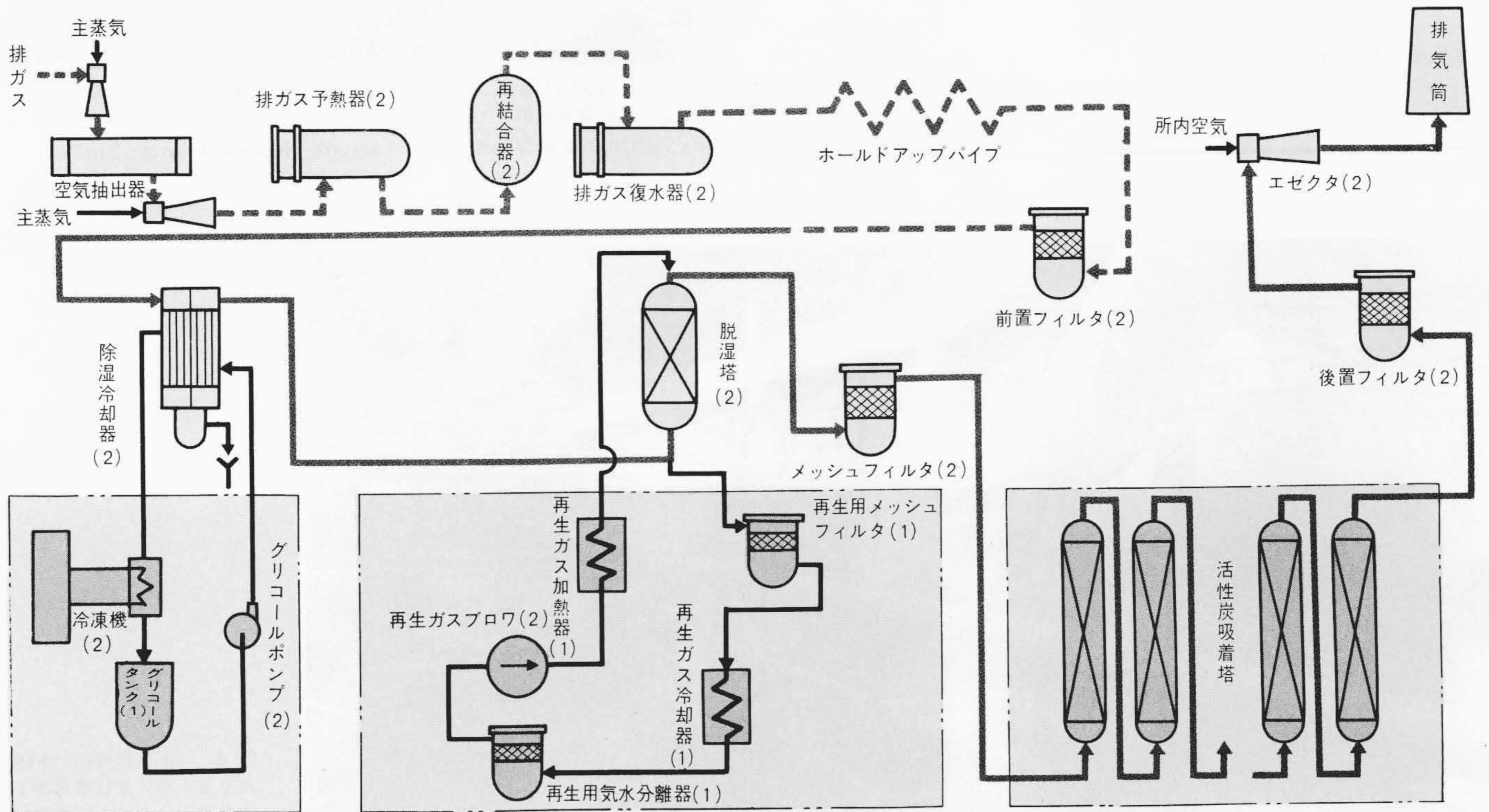


図6 希ガスホールドアップ装置の標準フローシート 点線部は従来の気体廃棄物処理系を、また機器名称中、()内の数字は機器の基数を示している。

Fig. 6 Standard Flow Sheet of Charcoal Adsorber System

レングリコール)を循環させる。

本系統の特長を以下に述べる。

- (1) 活性炭の希ガスホールドアップ性能を高めるために前処理として行なう湿分の除去方法としてモレキュラーシーブなどの合成ゼオライトを充填(てん)した脱湿塔を採用した。この方法は、冷却脱湿法に比べ信頼性が高く、容易に極低露点のガスが得られるなどの利点を有している。
- (2) 排ガスの外部漏えいによる空気汚染を防止するため、系統を負圧で運転する。その手段として、構造が簡単で保守が容易で、しかも信頼性の高い空気駆動エゼクタを採用した。
- (3) 経済性および運転、保守の容易性を考慮し、活性炭吸着塔は、常温で運転される。
- (4) 排ガスに接する部分の弁類はすべてベローシール弁とし、排ガス漏えいを防止している。

6 設計仕様

表1は、敦賀発電所および福島1号機に設置された希ガスホールドアップ装置の仕様である。

表1 希ガスホールドアップ装置の仕様 敦賀および福島原子力発電所に設置された希ガスホールドアップ装置の仕様である。

Table 1 Specification of Charcoal Adsorber System Equipped in Tsuruga-2 and Fukushima-1 NPS

プラント名 項目	敦賀発電所	福島1号機
設計排ガス流量	定格：20Nm ³ /h 最大：40Nm ³ /h	定格：20Nm ³ /h 最大：30Nm ³ /h
希ガスホールドアップ時間	Xe：20日間 Kr：28時間	Xe：27日間以上 Kr：40時間以上
系統運転圧力	負圧	負圧
活性炭吸着塔運転温度	常温	常温
使用活性炭	国産活性炭	国産活性炭

7 装置外観

図7および図8は、希ガスホールドアップ装置の写真であって、図7は、敦賀発電所における活性炭吸着塔を、図8は、福島1号機における冷凍設備の外観を示すものである。

8 運転実績

8.1 装置運転実績

図9は、福島1号機希ガスホールドアップ装置の運転特性を示したものである。本データは、原子炉起動時のものであ

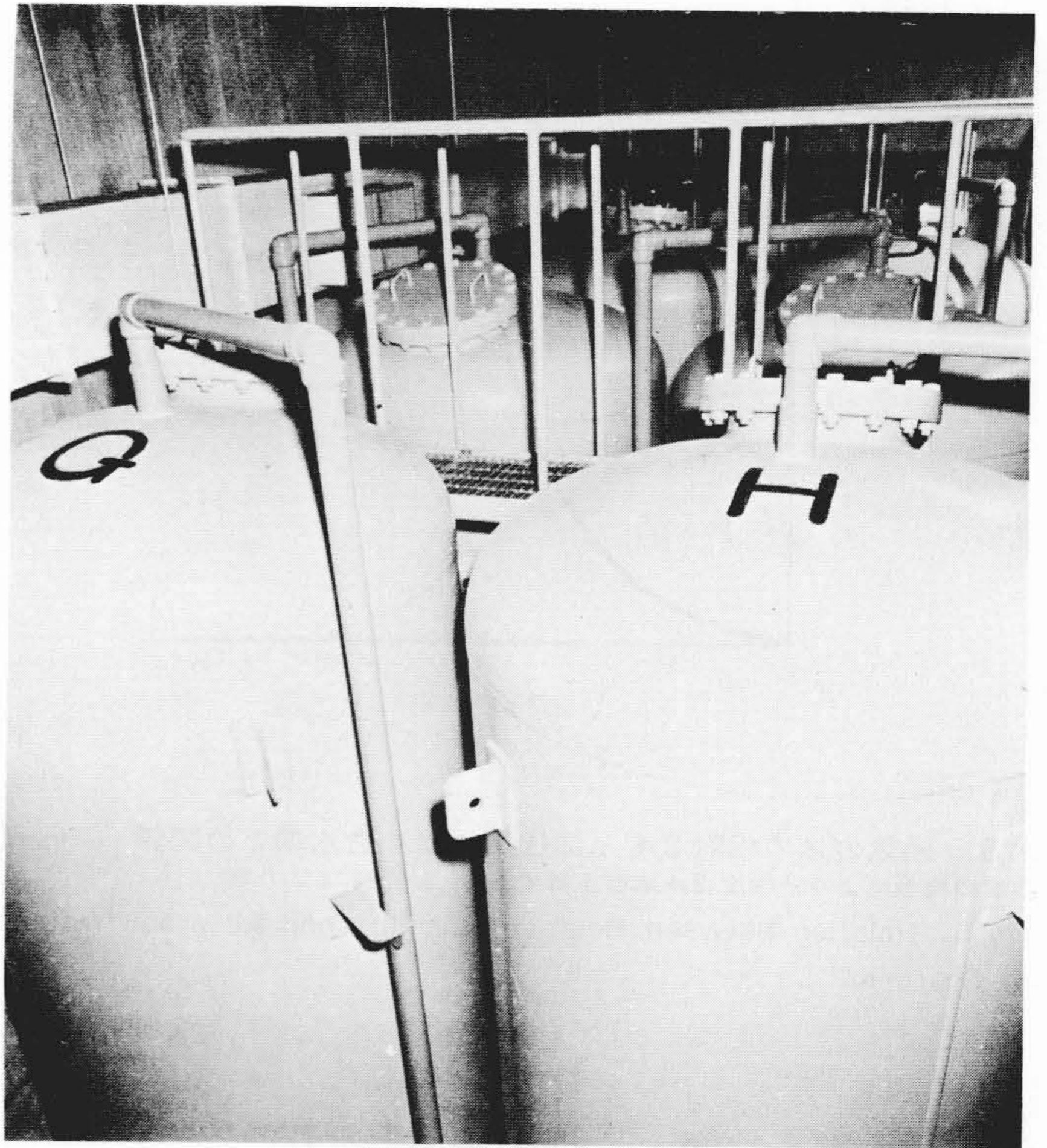


図7 活性炭吸着塔の外観 日本原子力発電株式会社敦賀発電所における活性炭吸着塔を示す。

Fig. 7 Charcoal Vessels of Tsuruga Nuclear Power Station

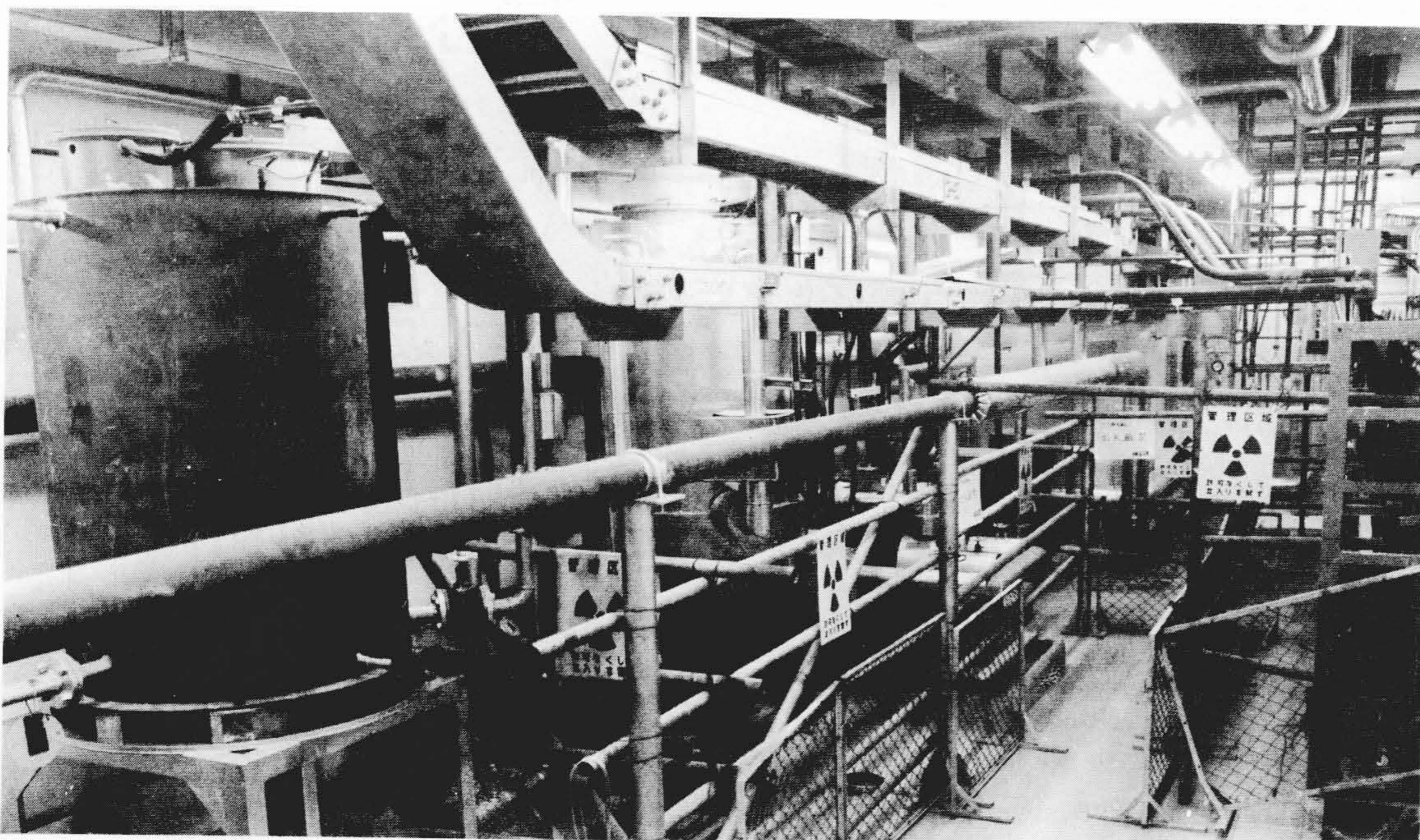


図8 冷凍設備の外観 東京電力株式会社福島原子力発電所における除湿冷却器用冷凍設備を示す。

Fig. 8 Chiller Unit of Fukushima Nuclear Power Station, No. 1

り、系統流量の変動に対して、装置が安定して稼動していることを示している。排ガスの脱湿については活性炭吸着塔の入口で、 $-40\sim-60^{\circ}\text{C}$ の露点が安定して得られており、脱湿塔がその機能を十分に発揮していることを示している。空気駆動のエゼクタは、他に使用例があまりみられないが、本装置においては、よくその性能を発揮しており、吸入側圧力についても制御が円滑に行なわれている。

図10は脱湿塔再生時の温度変化の状態を示すもので、脱湿塔は、加熱再生に続いて強制冷却が行なわれる。脱湿塔上部は、脱湿塔加熱時には加熱ガスの入口にあたり、冷却時には冷却ガスの出口にあたる。脱湿塔下部の温度変化より、1塔あたり約8時間で再生が完了していることがわかる。また、再生完了時の脱湿塔温度より、脱湿剤は含水率約4%まで再生されていると考えられる。

8.2 Kr 試験結果

実負荷運転にはいる前に、Kr-85をトレーサとして用い、あらかじめ装置の希ガスホールドアップ性能の確認試験を行なう。すなわち、系統をほぼ設計条件下で運転し、活性炭吸着塔入口にKr-85を所定量注入し、その後、活性炭吸着塔出口

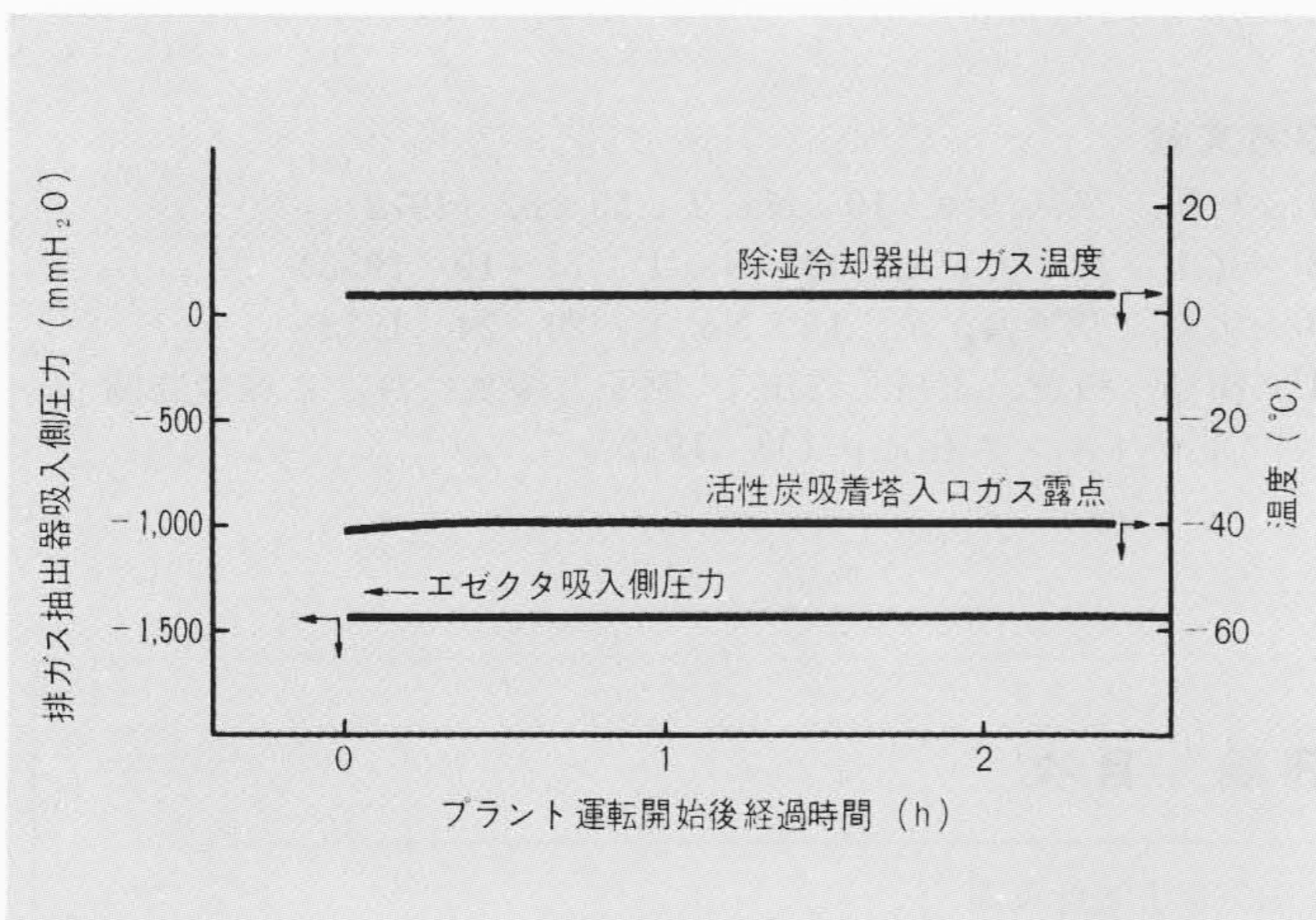


図9 希ガスホールドアップ装置の運転特性 本データは、原子炉起動時のものであるが、系統流量の変動に対して、安定した運転状態を示している。

Fig. 9 Performance of Charcoal Adsorber System at Start up Operation

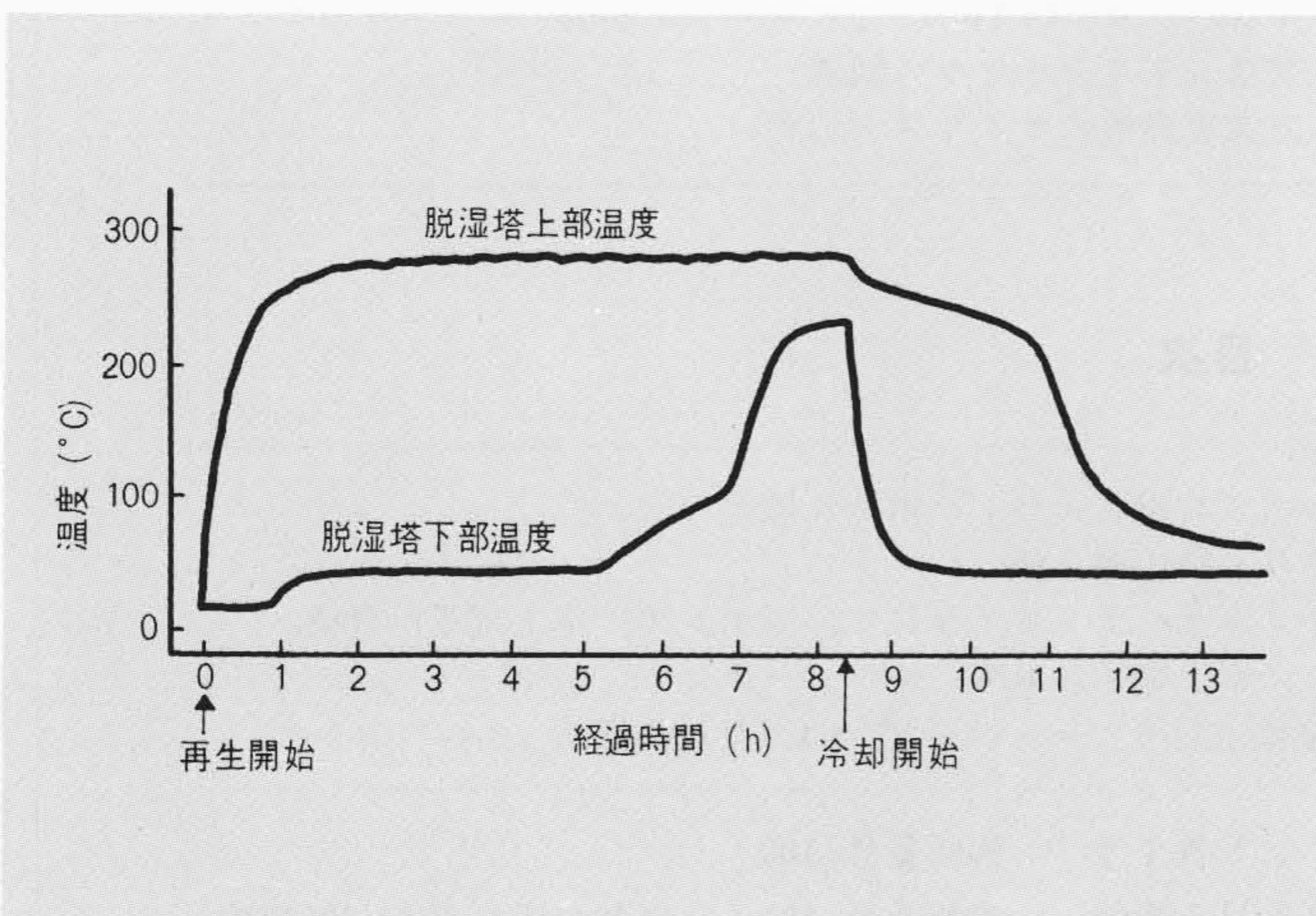


図10 脱湿塔再生時の運転特性 脱湿塔上部は、脱湿塔加熱時には、加熱ガスの入口にあたり、冷却時には出口にあたる。加熱時の脱湿塔下部温度(脱湿塔出口ガス温度)変化曲線において、平坦部分は、水分の脱着期間にあたり、その後の急激な上昇は水分がほとんど脱着したことを示している。

Fig. 10 Regenerating Performance of Dehumidifier

からKr-85が検出されるまでの時間を測定する。この時間により活性炭のホールドアップ性能の確認が可能である。図11は代表的な試験結果のチャートを示したものである。なお、敦賀発電所および福島1号機において得られた試験結果は、実負荷試験結果とともに表2に示すとおりである。

8.3 実負荷試験結果

実負荷運転にはいつてからの、活性炭吸着塔第1塔め出入口におけるKr-85mの放射能強度を測定し、その減衰比から求めた設計流量におけるホールドアップ時間を、Kr試験結果とあわせて表2に示した。表よりわかるように、Kr試験および実負荷試験の結果はともに、設計値を十分満足していることを示している。

9 評価

表3は、敦賀発電所における希ガスホールドアップ装置設置前後の、排気筒からの放射能放出実績である⁽³⁾。

また、福島1号機における設置前後の放出実績は表4に示すとおりであり⁽³⁾、設置後、排気筒における放射能は約数十分の一に減少している。

以上のデータより、希ガスホールドアップ装置の設置は、従来、排気筒からの放射能の大部分を占めていた空気抽出器系排ガスの放射能を著しく低減するとともに、原子力発電所の安全性の向上に対しきわめて大きな貢献をなすことが実証された。

表2 希ガスホールドアップ性能の実績 Kr試験結果および実負荷試験結果は、設計条件下でのホールドアップ時間に換算してある。

項目	プラント名	敦賀発電所	福島1号機
	希ガスホールドアップ時間	設計値	Kr : 28時間 Xe : 20日間
Kr試験結果		Kr : 33時間 Xe : 25日間	Kr : 50時間 Xe : 37日間
実負荷試験結果		Kr : 40時間 Xe : 30日間	Kr : 48時間 Xe : 36日間

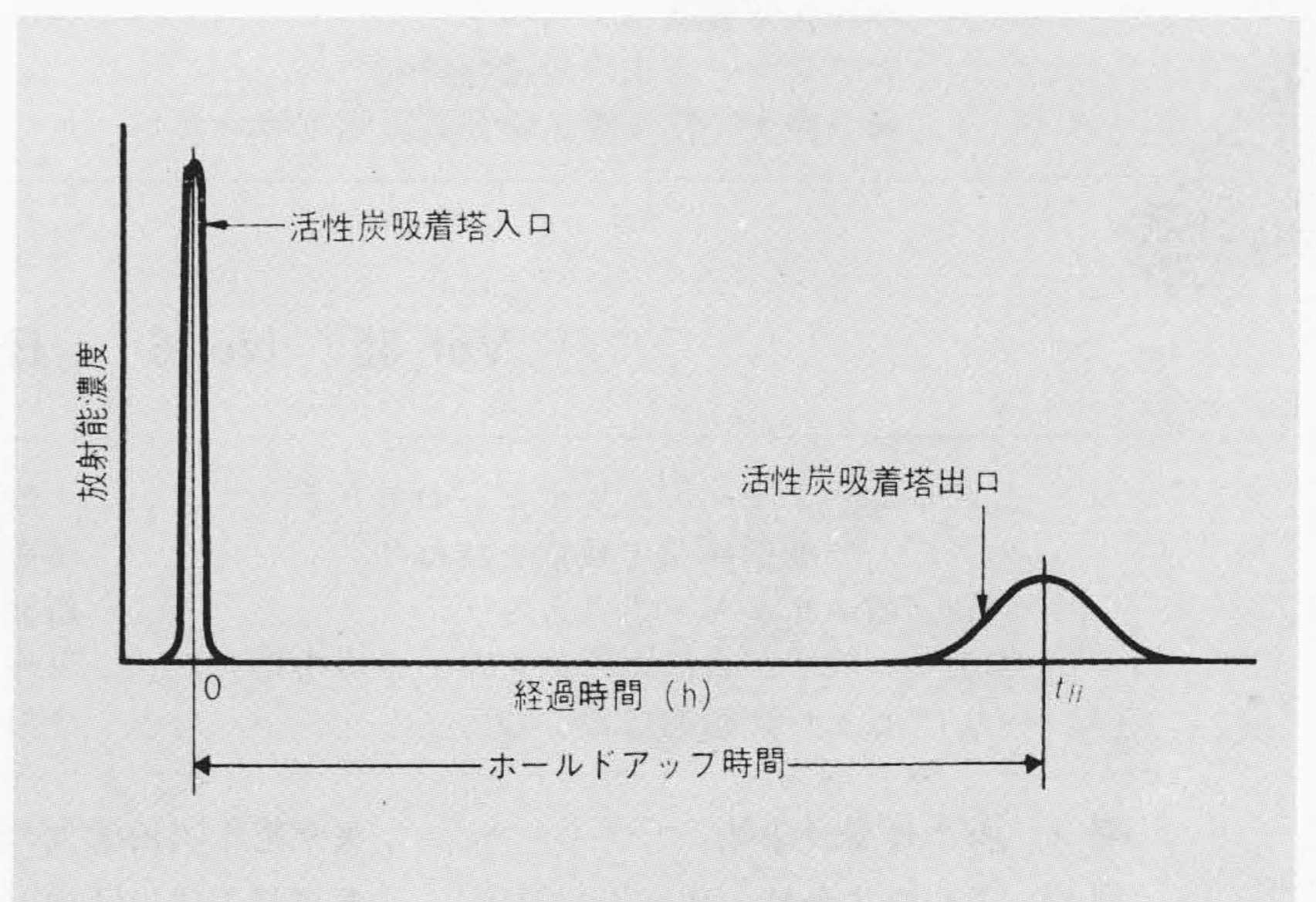


図11 Kr試験により得られる代表的なチャート 時間0において活性炭吸着塔にパルス状に注入されたKrは t_H 時間経過後、活性炭吸着塔出口より図のような分布をもって流出する。

Fig. 11 Kr Elution Curve at Kr Test

表3 敦賀発電所における希ガスホールドアップ装置設置前後の放射能放出実績 本データは、排気筒からの平均放出率を示す。

Table 3 Reduction of Radioactivity at Tsuruga Nuclear Power Station

年度 項目	45年	46年*	47年**
総放出量	1.3×10 ⁵ Ci	4.2×10 ⁴ Ci	3.5×10 ³ Ci
年平均放出率	4.2mCi/s	1.3mCi/s	0.22mCi/s

注：* 昭和46年12月3日より希ガスホールドアップ装置運転開始。
** 47年度は4～9月の値である。

表4 福島1号機における希ガスホールドアップ装置設置前後の放射能放出実績 本データは、排気筒からの平均放出率であり、希ガスホールドアップ装置設置後著しく低下している。

Table 4 Reduction of Radioactivity at Fukushima Nuclear Power Station, No. 1

昭和46年		昭和47年	
月	平均放出率 (mCi/s)	月	平均放出率 (mCi/s)
4	3.8	1	1.4
5	3.9	2	2.7
6	0.9	3	3.6
7	2.5	4	4.7
8	3.1	5	16
9	2.0	6	13
10	—	7	0.3
11	0.3	8	0.6
12	2.3	9	0.4

注：昭和47年7月からは活性炭ホールドアップ装置を使用。

10 結 言

動力炉核燃料開発事業団からの委託のもとに、新型転換炉原型炉「ふげん」用として約3年間にわたって実施された研究成果である希ガスホールドアップ装置は、同事業団のご了解のもとに敦賀あるいは福島原子力発電所において実用化され、その有用性が十分に実証された。本装置の採用は、排気筒からの放射能放出を従来に比べ著しく低減させると同時に、ますますきびしくなることが予想される環境保全に対してもきわめて有効な手段であることが判明した。

ちなみに、今後運転開始あるいは建設が予定されているBWR原子力発電所には、すべて希ガスホールドアップ装置の設置が計画されている。

われわれは環境への影響を技術的かつ実用的に可能な限り少なくするという基本的な姿勢にのっとり、将来も広範囲にわたって開発研究を展開する所存である。終わりに臨み、希

ガスホールドアップ装置の開発研究に対し多大なご援助をいただいた動力炉核燃料開発事業団に深く謝意を表わす次第である。

参考文献

- (1) 村田：空気清浄 10 No. 2, 55～62 (1972)
- (2) 井上：原子力工業 19 No. 1, 14～19 (1973)
- (3) 川人：原子力工業 19 No. 1, 20～24 (1973)
- (4) 田島, 板倉, 市川, 吉田：「原子力産業における環境問題」(ソフトサイエンス社) p.138 (1972)

Vol. 55 No. 6 日立評論 目次

■ 論 文

- 貫流ボイラの負荷応答の改善
- 火力発電所用トランジスタ形発電機保護継電装置
- センジマーミルの計算制御
- 二波長測光法の比色分析への応用
- 日立静止形無瞬断電源システム「HIVERTER」
- パルス幅変調インバータ
- センジマーミルの最近の動向
- 磁気浮上特性基礎試験装置用超電導マグネット

磁気浮上走行車両

154kV OFケーブル用新形油止接続箱

■ パワーエレクトロニクスによるモータ制御特集

- パワーエレクトロニクスによるモータ制御の動向
- 産業用サイリスタモータ
- 車両用サイリスタモータ
- インバータ(AVAF)によるモートル制御
- ブラシレスセルビウス制御
- 直流電動機のサイリスタ制御

Vol. 35 No. 6 日立 目次

- 製品ルポ/クリーンエネルギーの送り手
- 醸造研究の殿堂を訪ねて
- 対談/省エネルギーを考える
- 家電コーナー/自然の冷気をおへやの中に
- インタビュー/緑をはぐくむ

- 一般科学ルポ/お母さんバレーボール教室
- 美術館めぐり/畠山記念館
- 新製品紹介/カラーテレビ、ラジオ、ステレオ、卓上電子計算機
- 海外だより/卓上電子計算機 スウェーデン
- 今月の豆知識/空冷ヒートポンプ、CCTVとCATV

発行所 日立評論社 東京都千代田区丸の内一丁目5番1号 郵便番号 100
 取次店 株式会社 オーム社書店 東京都千代田区神田錦町3丁目1番地 郵便番号 101 振替口座 東京 20018番