

JAERI-Tech  
2002-003



JP0250123



IASCC照射試験のための  
水質調整系に関する設計検討

2002年2月

森 雄一郎・井手 広史・鍋谷 栄昭・塚田 隆

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

## IASCC 照射試験のための水質調整系に関する設計検討

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

森 雄一郎※・井手 広史・鍋谷 栄昭・塙田 隆<sup>+</sup>

(2002年1月4日受理)

高経年水炉の信頼性・安全性を確保する上で、炉内構造物に発生するおそれのある照射誘起応力腐食割れ (IASCC : Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking) は、重要かつ緊急な検討課題とされており、このための材料照射研究が計画されている。また、原子炉材料の照射研究の進展に伴い、照射試験中の環境を高精度に制御することが要求されており、特に IASCC 研究のための照射試験では、中性子照射量や照射温度に加えて、水質の制御が重要である。

このような状況から原研では、沸騰水型軽水炉 (BWR : Boiling Water Reactor) の炉内環境を模擬した条件下での材料照射試験が可能な高度材料環境照射装置を材料試験炉 (JMTR : Japan Materials Testing Reactor) に設置するための設計検討を行った。

高度材料環境照射装置は、試験片を収納し炉内へ装荷される飽和温度キャップセル、同キャップセルへ水質調整した高温高圧水を供給する水環境制御装置などから構成される。本報告書は、1999 年度に行った水環境制御装置の水質調整系に関する設計検討の内容をまとめたものである。

---

大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

+ 東海研究所 エネルギーシステム研究部

※ 外来研究員 (川崎重工業 (株))

Design Study of Water Chemistry Control System  
for IASCC Irradiation Test

Yuichiro MORI<sup>※</sup>, Hiroshi IDE , Hideaki NABEYA and Takashi TSUKADA<sup>+</sup>

Department of JMTR  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received January 4, 2002)

In relation to the aging of Light Water Reactor (LWR), the Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking (IASCC) has been regarded as a significant and urgent issue for the reliability of in-core components of LWR, and the irradiation research on the IASCC is now under schedule. With the progress of the irradiation research on reactor materials, well-controlled environment conditions during irradiation testing are required. Especially for irradiation testing of IASCC studies, water chemistry control is essential in addition to the control of neutron fluence and irradiation temperature.

According to these requirements, at the Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), an irradiation testing facility that simulates in-core environment of Boiling Water Reactor (BWR) has been designed to be installed in the Japan Materials Testing Reactor (JMTR).

This facility is composed of the Saturated Temperature Capsules (SATCAP) that are installed into the JMTR's core to irradiate material specimens, the Water Control Unit that is able to supply high-temperature and high-pressure chemical controlled water to SATCAP, and other components.

This report describes the design study of water chemistry control system of the Water Control Unit. The design work has been performed in the fiscal year 1999.

Keywords: LWR, IASCC, Irradiation Test, Water Chemistry Control, BWR, JMTR

---

+ Department of Nuclear Energy System, Tokai Research Establishment  
※ On leave from Kawasaki Heavy Industries, LTD.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 水環境制御装置の概要 .....	1
2.1. 水環境制御装置の全体構成 .....	1
2.2. 水質調整系 .....	1
2.3. 給水系 .....	2
2.4. 補給水系 .....	2
2.5. 計測制御系 .....	2
3. 水質の調整目標および測定方法 .....	2
3.1. BWR の炉内水環境 .....	2
3.2. 水質の調整目標 .....	3
3.3. 水質の測定方法 .....	4
4. 水質調整方法の検討 .....	5
4.1. 精製システムの検討 .....	5
4.2. 溶存酸素濃度調整の検討 .....	7
4.3. 溶存水素濃度調整の検討 .....	11
5. 水素使用に関わる安全性の検討 .....	12
5.1. 安全設計の方針 .....	12
5.2. ヘリウム・水素混合ガス供給設備の法規上の取り扱いについて .....	12
5.3. 所内水素取り扱い施設における安全対策 .....	13
5.4. ヘリウム・水素混合ガス供給設備における安全対策 .....	13
5.5. 水素取り扱いに関する安全対策用品 .....	14
6. まとめ .....	15
謝 辞 .....	16
参考文献 .....	17

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Overview of Water Control Unit .....	1
2.1 Composition of Water Control Unit .....	1
2.2 Water Chemistry Control System .....	1
2.3 Water Supply System .....	2
2.4 Water Replenish System .....	2
2.5 Measurement and Control System .....	2
3. Target and Methods of Water Chemistry Control and Measurement .....	2
3.1 Water Chemistry of BWR Power Plant .....	2
3.2 Target of Water Chemistry Control .....	3
3.3 Methods of Water Chemistry Measurement .....	4
4. Design Study of Water Chemistry Control Technique .....	5
4.1 Water Purification System .....	5
4.2 Concentration of Dissolved Oxygen Control .....	7
4.3 Concentration of Dissolved Hydrogen Control .....	11
5. Design Study on Safety of Hydrogen Handling .....	12
5.1 Policy on Safety Design .....	12
5.2 Applicable Regulation for He-H <sub>2</sub> Mixed Gas Feeding Facility .....	12
5.3 Safety of Hydrogen Handling Facilities in JAERI .....	13
5.4 Safety Design of He-H <sub>2</sub> Mixed Gas Feeding Facility .....	13
5.5 Safety Goods for Hydrogen Handling .....	14
6. Conclusion .....	15
Acknowledgments .....	16
References .....	17

## 1. はじめに

軽水炉の炉内構造物に使用されているステンレス鋼は、高線量の中性子照射を受けると照射誘起応力腐食割れ（以下、IASCC）を起こす可能性があり、IASCC は高経年軽水炉の信頼性・安全性を確保する上で重要かつ緊急な検討課題とされている。このため原研では、中性子照射、高温高压水による腐食および応力が作用する条件下での材料に関する IASCC 挙動についての研究を計画している。また、原子炉材料の照射研究の進展に伴い、照射試験中の化学環境の精度の高い制御が要求されており、特に、IASCC 研究のための照射試験では、中性子照射量や照射温度に加えて、材料の腐食に関する主要因である水質の制御が重要である。

このような状況から原研では、沸騰水型軽水炉（以下、BWR）の炉内環境を模擬した条件での材料照射試験が可能な高度材料環境照射装置を JMTR に設置するための設計検討を行った。

高度材料環境照射装置は、炉心の任意の位置に装荷できるキャップセルを用いた照射試験を前提としており、図 1 に示すように、試験片を収納し炉内へ装荷される飽和温度キャップセル（以下、キャップセル）、キャップセルへ高温高压水を供給する水環境制御装置などから構成される。

本報告は、1999 年度に行った水環境制御装置全体に関する設計検討のうち、キャップセルへ供給する水（以下、給水）の水質制御を行うための水質調整系の設計検討に関するものであり、水質の調整目標および測定方法に関する検討結果（第 3 章）および水質調整方法に関する検討結果（第 4 章）についてまとめた。また、給水の溶存酸素濃度、溶存水素濃度などを所定の試験条件に制御するために可燃性の水素ガスを使用することから、その安全対策（第 5 章）についても所内の水素取扱施設の調査結果などとともに記した。

## 2. 水環境制御装置の概要

### 2.1 水環境制御装置の全体構成

水環境制御装置は、JMTR 原子炉内の任意の照射孔に装荷されるキャップセルに高温高压水を供給し、キャップセル内に組み込まれた照射試験片の温度、給水の水質などを調整するための装置である。本装置は、水質調整系（クラッド除去フィルタ、イオン交換塔、水質調整タンク、周辺機器）、給水系（主ポンプ、サージタンク、予熱管、加熱器、冷却管、圧力調節弁）、補給水系（補給水タンク、周辺機器）、計測制御系（流量・圧力・温度・水質などの計測機器、制御盤、データ収集装置）などから構成され、効率的に照射試験を実施するために同時に 5 本のキャップセルに給水することが可能である。本装置の概要を図 2 に示す。

### 2.2 水質調整系

水質調整系は、キャップセルへの給水を精製し、照射試験の目的に適応した水質に調整する系統である。IASCC 照射試験では、給水の水質の制御が特に重要であることから、本装置では、キ

キャップセルからの戻り水中の腐食生成物を除去するためのフィルタおよび混床式のイオン交換樹脂塔による精製システムで給水の全量精製が可能であるという特徴がある。また、気液2相式の水質調整タンクは、ヘリウム・水素混合ガス、酸素ガスまたはヘリウムガスの気泡を発生させるノズルを備えており、溶存酸素濃度および溶存水素濃度を自動制御で調整することが可能である。

### 2.3 給水系

給水系は、水質調整系で水質調整された給水をキャップセルへ、またキャップセルからの戻り水を水質調整系へと循環する系統である。水質調整された給水は、プランジャー型の主ポンプにより所定の圧力まで昇圧され、2重管式再生熱交換器型の予熱管および電気ヒータ式の加熱器により昇温された後、キャップセルへ供給される。給水は、キャップセルの下部から上部へと流れ、キャップセルに装荷されている試験片の表面を照射試験条件（照射温度）に保った後、キャップセルから排水され、本装置へ戻る。キャップセルからの戻り水は、予熱管、冷却管において降温され、圧力調節弁において降圧された後、再び水質調整系で精製、水質調整される。

### 2.4 補給水系

補給水系は、JMTR 純水補給系統から供給された脱気純水を貯蔵、精製し、運転開始前のキャップセルおよび水環境制御装置（水質調整系、給水系など）へ所要の純水を供給する。また、分析のための水サンプリングなどによる系外への排水を補うために、運転中にも自動的に純水を補給することができる。補給水タンクでは、水質調整タンクと同様にヘリウムガスの気泡を発生させノズルを備えており、自動制御で更に純水を脱気することが可能である。また、補給水の水質を一定に保つために、イオン交換塔およびUVランプによる精製が可能な循環ラインを備えている。

### 2.5 計測制御系

計測制御系は、水環境制御装置の運転に必要となる流量・圧力・温度・タンク水位などを計測、制御するとともに、照射試験データである試験片温度、水質などを計測、データ収集するための設備である。水質計としては、溶存酸素濃度計、溶存水素濃度計、導電率計、pH計などをキャップセル出入口、水質調整タンク出口、イオン交換塔出口および補給水タンク出口に備えている。

## 3. 水質の調整目標および測定方法

### 3.1 BWR の炉内水環境

BWR の炉内環境を模擬した条件下での材料照射試験を行うため、BWR の水質管理値について情報を収集し、整理した。

国内 BWR の代表的な水質管理値を表 1 および表 2 に示す。また、腐食環境緩和技術としての水質制御として原子炉水への水素注入などが行われており<sup>1) - 3)</sup>、それに伴う、溶存酸素濃度、

溶存水素濃度、腐食電位（ECP）などの測定・管理が行われている。

また、IASCC 照射下試験時の水質管理の例として OECD Halden Reactor Project (以下、Halden) の高温高圧水ループ (BWR 条件) における水質を表 3 に示す。

### 3.2 水質の調整目標

BWR における水質管理値などを基に、水環境制御装置における給水の水質調整・制御項目および目標値の検討を行った。検討の結果を表 4 に示す。ここで調整項目とは、パラメータの値をフィードバックせず、他のパラメータの値を変化させることなどにより間接的に調節する項目のことを指し、制御項目とは、パラメータの値をフィードバックし、目標とする値に直接的に調節する項目のことを指している。

#### (1) 導電率

導電率は、水中の不純物や腐食生成物に対して敏感であり、キャプセルへの給水の純度を管理する上で重要な因子であるため、調整項目に設定し、BWR の水質で良好な状態<sup>2)</sup>であるとされている「 $\leq 0.1 \mu\text{S}/\text{cm}$ 」を目標値とする。

#### (2) pH

pH は、導電率を構成するイオン種の影響を判断することができる<sup>1)</sup>重要な因子であるため、導電率と同様に調整項目に設定する。目標値は、BWR の水質および JMTR の純水製造設備から供給される純水の pH を考慮し「5.5～7.0」とする。

#### (3) 塩素イオン (Cl<sup>-</sup>)

塩素イオンは、応力腐食割れ (SCC : Stress Corrosion Cracking) を加速する因子<sup>1)</sup>であるため、調整項目に設定する。目標値は、国内 BWR における塩素イオン濃度の管理値以下であり、JMTR の純水製造設備から供給される純水の塩素イオン濃度である「<10 ppb」とする。

#### (4) 硫酸イオン (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)

硫酸イオンは、イオン交換樹脂が主な発生源となっており、塩素イオンと同様に SCC を加速する因子<sup>1)</sup>であるため、調整項目に設定する。目標値は、BWR の水質で良好な状態<sup>2)</sup>であるとされている「<5 ppb」とする。

#### (5) 溶存酸素

BWR においては、腐食環境緩和策として溶存酸素濃度を低下させるため、起動時の脱気運転などが行われている。水環境制御装置においては、腐食抑制効果、応力腐食割れ感受性に対する溶存酸素依存性などのデータを取得するため、水質の制御項目に設定する。制御範囲の目標値は、BWR における溶存酸素濃度の管理値などを参考にして、通常水質 (NWC : Normal Water Chemistry) 模擬条件では「数 ppb～200 ppb」とする。

#### (6) 溶存水素

近年の国内 BWR において、応力腐食割れ抑制の効果が大きいと考えられている水素注入 (HWC : Hydrogen Water Chemistry) が採用されている。水環境制御装置においては、溶存酸素濃度の低減効果、腐食電位 (ECP : Electrochemical Potential) の低減効果に対する溶存水素依存性などのデータを取得するため、溶存酸素と同様に水質の制御項目に設定する。調

整範囲の目標値は、BWR における水素注入時の溶存水素濃度を参考にして「最大 1ppm」とする。

#### (7) 腐食電位 (ECP)

原子炉内における構造材料の ECP は、その構造材が存在している環境水質の酸化性の度合いを示す指標であり、IASCC に関する水質条件のうちの主要なパラメータであることから、水環境制御装置においても ECP の調整が重要であると考えられる。しかし、ECP の調整技術については、照射場の種々の環境に大きく依存すると考えられ、現時点では不明確な点もあることから、ECP の調整は努力目標とし、その調整範囲の目標値は、BWR における ECP の範囲を考慮し「 $-400\text{mV}_{\text{SHE}} \sim +200\text{mV}_{\text{SHE}}$ 」とする。

#### (8) 全有機炭素 (TOC)

全有機炭素 (TOC : Total Organic Carbon) は、イオン交換樹脂から流出した有機物が主な発生源となっている。TOC は、原子炉内で照射されることにより、塩素イオン、硫酸イオンなどを生成し、腐食対策上悪影響を与える因子であるため、イオン交換樹脂の選定に当たっては考慮する。

### 3.3 水質の測定方法

3.2 項に示した水質調整・制御を行う各項目について、水質の測定点および測定方法の検討を行った。水質測定は、系統内で直接測定を行う「インライン測定」および系統外へサンプリングして手分析により測定を行う「サンプリング測定」を組み合わせて行うこととした。水環境制御装置における水質測定点を図 3 に、水質測定方法を表 5 に示す。

低温・低圧部でインライン測定を行う導電率計、pH 計、溶存酸素濃度計および溶存水素濃度計については、JMTR で使用実績のある水質計を使用する。また、インライン測定のための給水流量は、各水質計の適用流量範囲を考慮して  $200\text{ml/min}$  とする。なお、pH 測定後の給水は、比較用の標準液として使用する KCl 溶液の万一の流出に備え、イオン交換塔の上流側に戻すこととした。

高温・高圧部でインライン測定を行う導電率計、pH 計および ECP 計については、フィンランド国立技術研究センター (VTT) が開発し、同国の原子力発電プラントなどで使用実績のある Cormet 社製 “TrendChem” 高温水化学モニタリングシステムを採用することとした。

水環境制御装置におけるインライン測定用水質計の仕様を表 6 に示す。

また、塩素イオン、硫酸イオン、クラッドなどの測定は、イオンクロマトグラフ、誘導結合プラズマ (ICP : Inductively Coupled Plasma) 分光分析装置、などを用いた手分析によるサンプリング測定を行う。

## 4. 水質調整方法の検討

### 4.1 精製システムの検討

水環境制御装置の水質調整系には、3.2 項に示した水質調整・制御項目のうち、導電率、pH、硫酸イオン、TOC などの各項目が、設定した目標値を満足するような「良好な水質」を得るために精製システムを備える必要がある。

導電率、pHなどは、キャップセルを含む装置構成材料および試験片が腐食することによって発生する腐食生成物などの存在に影響されるため、良好な水質を得るためにには、腐食生成物などを除去する必要がある。そこで精製システムは、クラッドと呼ばれる固形状の腐食生成物を除去するための「クラッド除去フィルタ」と、イオン状の腐食生成物を除去するための「イオン交換塔」により構成し、精製の効率を高めるために給水の全量を精製する方式とする。

#### 4.1.1 クラッド除去フィルタの検討

##### (1) フィルタ形式の検討

クラッド除去フィルタに採用する形式を選定するために、一般にクラッドを除去するため有効と考えられる各種フィルタの特徴と BWR 等への適用実績を考慮して評価を行った。各種フィルタの特徴、適用実績および評価を表 7 に示す。国内 BWR で使用されているプリコート形フィルタは、フィルタエレメントにプリコートされたイオン交換樹脂により、クラッド除去と同時にイオン除去を行うことが可能であるが、定期的なプリコート材の張り替えが必要であり、2 次廃棄物が発生するという短所がある。これに対して中空糸膜フィルタは、無数の微少な穴が外表面から内表面へ貫通している直径数百  $\mu\text{m}$ ～数 mm の中空纖維を束ねたもので、ろ過性能および逆洗性に優れている。また中空糸膜フィルタは、2 次廃棄物の発生が少ないことなどから、プリコート形フィルタに代わるものとして最近の BWR プラントで採用されている。これらのことから、水環境制御装置のクラッド除去フィルタには、中空糸膜フィルタを採用し、逆洗が可能な機器構造とする。

##### (2) ろ過性能の検討

軽水炉では通常、孔径  $0.45 \mu\text{m}$  のメンブレンフィルタによって捕集可能な腐食生成物をクラッドと称している<sup>1)</sup>ことから、クラッド除去フィルタに採用する中空糸膜モジュールには、 $0.45 \mu\text{m}$ （捕集効率：99%以上）のろ過性能を有するものが必要である。さらに、逆洗性を考慮して、付着物質の剥離性に優れている親水化ポリスルホンを材料とした（株）クラレ製 SF-8108A 中空糸膜モジュールを採用する。SF-8108A 中空糸膜モジュールの性能曲線を図 4 に示す。

#### 4.1.2 イオン交換塔の検討

##### (1) イオン交換装置形式の検討

イオン交換装置の形式は、以下に示す混床式と複床式に分類されるが、イオン交換塔には、給水を下降流で通水するだけで高純度に精製することができる混床式を採用する。また、イ

オン交換樹脂の再生を行わない非再生方式を採用し、陽イオン交換樹脂の化学再生に伴う  $\text{Na}^+$  の流入および放射能汚染した樹脂の化学再生に伴う放射性廃液の生成を防止するように考慮する。

#### ①混床式

陽イオン交換樹脂と陰イオン交換樹脂を同一樹脂塔に充填して混合したもので、原水を下降流で通水するだけで、極めて高純度の純水を得ることができる<sup>6)</sup>。

#### ②複床式

陽イオン交換樹脂と陰イオン交換樹脂をそれぞれ別々の樹脂塔に充填する方式で、処理水の純度の点では混床式に及ばない<sup>6)</sup>。

### (2) イオン交換樹脂の選定

イオン交換塔に充填するイオン交換樹脂は、放射線分解しにくい原子力用のもので、かつ硫酸イオン、硝酸イオンの溶出が少ない全有機炭素量（TOC）を制限したものとする。これらの条件を満足する代表的なイオン交換樹脂の特性<sup>1) 7)</sup>、使用実績<sup>1) 9)</sup>を表 8 に示す。いずれのイオン交換樹脂も特性的にはほぼ同等であると考えられるため、イオン交換塔に使用するイオン交換樹脂には、BWR および JMTR における使用実績を考慮して、Rohm & Haas 社製 Amberlite の IR120B（陽イオン交換樹脂）および IRA400J（陰イオン交換樹脂）を採用する。

### (3) イオン交換樹脂量の検討

#### ①計算方法

キャップセルを含む装置構成材料および試験片の腐食により発生するイオン状腐食生成物の予想溶出量から、イオン交換に必要な樹脂量を計算した。溶出するイオン状腐食生成物は、装置構成材料のステンレス鋼成分であると考えられるが、ここではすべてが  $\text{Fe}^{3+}$  であると仮定して計算した。

#### ②計算条件

##### ◎接水部分（腐食対象部）の表面積

高温のため腐食による溶出が起こりやすいと考えられるキャップセル（試験片を含む）、高温機器（予熱管、加熱器、冷却管）および高温配管（予熱管～加熱器～キャップセル～予熱管～冷却管）と給水が接する部分の面積とする。

$$2.7 \text{ m}^2 + 21.1 \text{ m}^2 + 4.8 \text{ m}^2 = 28.6 \text{ m}^2 \quad \text{余裕を見込んで、} 30 \text{ m}^2 \text{ とする。}$$

##### ◎ステンレス鋼の溶出速度

キャップセル、高温機器および高温配管の材料に使用されている SUS316L の 288°C 純水中での金属放出量に基づいて、 $0.1 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{h}^{10)}$  を採用する。

##### ◎イオン交換樹脂の連続使用時間

イオン交換樹脂を毎年 2 回交換することを想定し、JMTR の年間運転サイクル数である 6 運転サイクルの半分（3 運転サイクル）に相当する 100 日とする。

$$100\text{day} \times 24\text{h} = 2400\text{h}$$

##### ◎陽イオン交換樹脂（IR120B）の交換容量

イオン交換樹脂メーカカタログ値の交換容量 2.0 mg 当量/ml-膨潤樹脂に余裕を見込

んで、0.5 mg 当量/ml-膨潤樹脂とする。

#### ◎給水（精製）流量

水環境制御装置にキャップセルを5本接続した場合の定格流量である1m<sup>3</sup>/hとする。

#### ③計算結果

計算条件より、イオン状腐食生成物の溶出量は、

$$0.1\text{mg/m}^2 \cdot \text{h} \times 30\text{m}^2 \times 2400\text{h} = 7200\text{mg}$$

ここで、Fe<sup>3+</sup>の1mg当量は、

$$55.8 / 3 = 18.6\text{mg-Fe}^{3+}$$

であるから、上記溶出量は、

$$7200\text{mg} / 18.6\text{mg-Fe}^{3+} = 388\text{mg 当量}$$

従って、必要となる陽イオン交換樹脂量は、

$$388\text{mg 当量} / 0.5\text{ mg 当量/ml-膨潤樹脂} = 776\text{ ml-膨潤樹脂}$$

また、陰イオン交換樹脂の充填割合を陽イオン交換樹脂の2倍とすると、必要となる全体の樹脂量は約2.5lとなる。ただし、ここで算出された樹脂量は必要最小限の量であり、連続して通水状態で使用する場合には、樹脂量(V)と単位時間当たり通水量(F)の比で表される空間速度(SV)および線速度(LV)を考慮する必要がある。

まず、JMTRの主な純水精製設備におけるSVを表9に示す。一般に、SV=15~25で使用されるため、イオン交換塔におけるSVを25とすると、必要となる樹脂量は、

$$V=F/ SV=1\text{m}^3/\text{h} / 25 = 0.04\text{m}^3 (40l)$$

また、一般にLV=10~30で使用されるため、イオン交換塔におけるLVを20とすると、必要となる樹脂充填部の断面積(S)、直径(D)および高さ(H)は、

$$S=F/LV=1\text{m}^3/\text{h} / 20 = 0.05\text{m}^2$$

$$D=(4 \times S / \pi)^{1/2} = (4 \times 0.05\text{m}^2 / \pi)^{1/2} \approx 0.25\text{m}$$

$$H=V/S=0.04\text{m}^3 / 0.05\text{m}^2 = 0.8\text{m}$$

以上より、水環境制御装置のイオン交換塔に充填する樹脂量は40lとし、樹脂充填部のサイズはΦ250mm×H800mmを目安とする。

## 4.2 溶存酸素濃度調整の検討

溶存酸素濃度の制御は、水環境制御装置の水質調整タンクにおいて、ヘリウムガスのバブリングによる酸素脱気または酸素ガスのバブリングによる酸素注入により行うこととした。

これらの酸素脱気および酸素注入による溶存酸素濃度の調整方法を検討するため、図5に示すような、バブリングにより発生する気泡と水の間で生じる気体拡散による物質移動を計算する「気体拡散モデル」を考えた。このモデルにより、酸素脱気および酸素注入における気体拡散(物質移動)の速度をバブリングによる気泡径をパラメータとして計算し、水中に溶存する酸素濃度の時間変化との関係を求め、溶存酸素濃度の制御性についての検討を行った。

### (1) 酸素脱気の計算

酸素ガスが溶解している水中に、ヘリウムガスをバブリングして行う酸素脱気(水中からの酸素ガスの溶出)は、図5に示すモデルにおいて、気泡(ヘリウム)界面の酸素濃度(C<sub>A0</sub>)

$\approx 0$  であり、水中の酸素濃度 ( $C_{A1}$ ) と  $C_{A0}$  との酸素濃度の差 ( $C_{A1} - C_{A0}$ ) により起こる気体拡散（物質移動）であると考えて、水環境制御装置の定格運転状態における条件での計算を行った。

直径  $d$  の気泡が水中を上昇する速度は、次式で示される<sup>11)</sup>。

$0.01 \text{ cm} < d < 0.2 \text{ cm}$  ( $200 < \text{Re} < 300$  程度) の場合

$$V_d = \sqrt{\frac{g \cdot d}{0.45}}$$

$0.2 \text{ cm} < d < 1.5 \text{ cm}$  ( $700 < \text{Re} < 4500$  程度) の場合

$$V_d = 30$$

ここで、

$V_d$  : 気泡の上昇速度 (cm/s)

$g$  : 重力加速度 (= 980.665 cm/s<sup>2</sup>)

$d$  : 気泡径 (cm)

$\text{Re}$  : レイノルズ数

また、気体拡散による物質移動速度は、次式で示される<sup>11)</sup>。

$$N_{Am} = 2 \sqrt{\frac{D_{AB} \cdot v_d}{\pi \cdot d}} \cdot |C_{A0} - C_{A1}| \dots \dots \dots \quad (1)$$

$$D_{AB} = \frac{a}{P} \cdot \left( \frac{T}{\sqrt{Tc_{He} \cdot Tc_{O_2}}} \right)^b \cdot (Pc_{He} \cdot Pc_{O_2})^{1/3} \cdot (Tc_{He} \cdot Tc_{O_2})^{5/12} \cdot \left( \frac{1}{M_{He}} + \frac{1}{M_{O_2}} \right)^{1/2}$$

$$a = 2.745 \times 10^{-4} \quad , \quad b = 1.823$$

$$Tc_{He} = 5.26 \text{ (K)} \quad , \quad Tc_{O_2} = 154.4 \text{ (K)}$$

$$Pc_{He} = 2.26 \text{ (atm)} \quad , \quad Pc_{O_2} = 49.7 \text{ (atm)}$$

$$M_{He} = 4.003 \text{ (g/mol)} \quad , \quad M_{O_2} = 32.00 \text{ (g/mol)}$$

ここで、  $N_{Am}$  : 物質移動速度 (mol/(cm<sup>2</sup>·s))

$D_{AB}$  : ヘリウム中における酸素の拡散係数 (cm<sup>2</sup>/s)<sup>12)</sup>

$T$  : 水の温度 (= 323 K)

$C_{A0}$  : 気泡界面の酸素濃度 (mol/cm<sup>3</sup>)

$C_{A1}$  : 水中の酸素濃度 (mol/cm<sup>3</sup>)

$P$  : 気泡の圧力 (水質調整タンクの運転圧力 = 2 ata (= 0.1 MPaG))

1 秒間に水と気泡の間で移動 (溶出または溶解) する酸素の量は、

$$W = N_{Am} \cdot t_c \cdot S \cdot N \dots \dots \dots \quad (2)$$

$$t_c = \frac{L}{v_d}$$

$$S = 4\pi \cdot \left( \frac{d}{2} \right)^2$$

$$N = \frac{Q \times 10^6 / P}{V \cdot 3600}$$

$$V = \frac{4}{3} \pi \cdot \left( \frac{d}{2} \right)^3$$

ここで、 $W$  : 1秒間に水と気泡の間で移動（溶出または溶解）する酸素量 (mol/s)

$t_c$  : 気泡の上昇時間 (s)

S : 気泡の表面積 (cm<sup>2</sup>)

N : 1秒間に発生する気泡の個数 (1/s)

L : 水の液高 (= 50 cm)

V : 気泡 1 個の体積 (cm<sup>3</sup>)

$Q$  : ガスの注入量 ( $= 0.1 \text{ Nm}^3/\text{h}$ )

水質調整タンク内に保有する水  $1\text{m}^3$

*w*

式(1)、式(2)、式(3)より、

式(4)の $\Delta C_{A1}$ を $\frac{dc_{A1}}{dt}$ と置き換えて整理すると、次の微分方程式で示される。

$$\frac{dC_{A1}}{|C_{A0} - C_{A1}|} = \left( \frac{2 \cdot t_C \cdot S \cdot N}{1 \times 10^6} \cdot \sqrt{\frac{D_{AB} \cdot v_d}{\pi \cdot d}} \right) \cdot dt \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

式(5)を解くと、

$$\int \frac{dC_{A1}}{|C_{A0} - C_{A1}|} = \int \left( \frac{2 \cdot t_c \cdot S \cdot N}{1 \times 10^6} \cdot \sqrt{\frac{D_{AB} \cdot v_d}{\pi \cdot d}} \right) \cdot dt + A \quad (\text{A は、任意定数})$$

$$\therefore \log|C_{A0} - C_{A1}| = -\left(\frac{2 \cdot t_c \cdot S \cdot N}{1 \times 10^6} \cdot \sqrt{\frac{D_{AB} \cdot v_d}{\pi \cdot d}}\right) \cdot t - A$$

ここで、 $X = \frac{2 \cdot t_c \cdot S \cdot N}{1 \times 10^6} \cdot \sqrt{\frac{D_{AB} \cdot v_d}{\pi \cdot d}}$  と置き換えると、

$$|C_{A0} - C_{A1}| = e^{[-X \cdot t - A]} = \frac{e^{-A}}{e^{X \cdot t}} \dots \dots \dots \quad (6)$$

式(6)において  $C_{A0} = 0$  と考え、 $t=0$  のときの溶存酸素濃度を 100 ppb とすると

$C_{A1} = \frac{100}{M \times 10^9}$ 、また、 $t=\infty$ のとき  $C_{A1}=0$ であるから、

$$e^{-A} = \frac{100}{M \times 10^9}$$

$$\therefore C_{A1} = \frac{100}{M \times 10^9} \cdot \frac{1}{e^{X \cdot t}} \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

ここで、M : 酸素の分子量 (= 32.00 g/mol)

式 (7) の単位を変換すると、ヘリウムバーリング開始から t 秒後の溶存酸素濃度は、

$$C_{D0} = \frac{100}{M \times 10^9} \cdot \frac{1}{e^{X \cdot t}} \cdot M \times 10^9 \\ = \frac{100}{e^{X \cdot t}}$$

$$\text{ただし、} X = \frac{2 \cdot t_c \cdot S \cdot N}{1 \times 10^6} \cdot \sqrt{\frac{D_{AB} \cdot v_d}{\pi \cdot d}}$$

ここで、CDO : 溶存酸素濃度 (O<sub>2</sub>-μg/H<sub>2</sub>O-ℓ = ppb)

## (2) 酸素注入の計算

酸素ガスが溶解していない水中に、酸素ガスをバーリングして行う酸素注入（水中への酸素ガスの溶解）とは、気泡（酸素）界面の酸素濃度 (C<sub>A0</sub>) ≈ 飽和濃度であり、水中の酸素濃度 (C<sub>A1</sub>) と C<sub>A0</sub> との酸素濃度の差 (C<sub>A1</sub> ≪ C<sub>A0</sub>) により起こる気体拡散（物質移動）であると考えて、酸素脱気と同様に計算を行った。

ただし、式 (1) において、DAB を水中における酸素の拡散係数 (= 4.7 × 10<sup>-5</sup> cm<sup>2</sup>/s)<sup>14)</sup> と置き換える。

また、式 (6) において C<sub>A0</sub> = 飽和濃度と考えると、t=0 のとき C<sub>A1</sub> = 0、t=∞ のとき

$$C_{A1} = C_{A0} = \frac{\alpha \cdot P}{22400} \text{ であるから、}$$

$$e^{-A} = \frac{\alpha \cdot P}{22400}$$

ここで、α : 水に対する酸素の溶解度 (= 0.0209 O<sub>2</sub>-ℓ/H<sub>2</sub>O-ℓ, @1ata, 50°C)<sup>13)</sup>

$$\therefore C_{A1} = \frac{\alpha \cdot P}{22400} \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{X \cdot t}}\right) \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

式 (8) の単位を変換すると、酸素バーリング開始から t 秒後の溶存酸素濃度は、

$$C_{D0} = \frac{\alpha \cdot P \cdot M \times 10^9}{22400} \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{X \cdot t}}\right) \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

$$\text{ただし、} X = \frac{2 \cdot t_c \cdot S \cdot N}{1 \times 10^6} \cdot \sqrt{\frac{D_{AB} \cdot v_d}{\pi \cdot d}}$$

## (3) 溶存酸素濃度の制御性の検討

計算により求めた、気泡径と溶存酸素濃度の時間変化の関係を図 6 に示す。図 6(a)の酸素脱気については、溶存酸素濃度 100ppb の水中に気泡径 0.7mm のヘリウムガスをバーリングすることにより、約 6min で 5ppb 以下まで減少させることができることを示している。また、図 6(b)の酸素注入については、溶存酸素濃度 0ppb の水中に気泡径 1.0mm の酸素ガスをバーリングすることにより、約 15sec で 200ppb 以上まで増加させることができることを示している。また同両図とも、気泡径が小さいほど、溶存酸素濃度を短時間で目標濃度ま

で到達できることを示しており、精度の高い制御が可能であるという見通しを得た。

以上より、水質調整タンクの内部は、水質調整用ガスのバブリングが可能な気液2相構造とし、液相部の下部には、気泡を発生させるためのノズル（以下、バブリングノズル）を設ける。また、溶存酸素濃度の精度の高い制御を行うため、バブリングノズルには、一般にフィルタなどに使用され、細かい気泡を発生させることのできるパイプ状の焼結ステンレス鋼を採用することとした。

#### 4.3 溶存水素濃度調整の検討

溶存水素濃度の制御は、4.2 項に示す溶存酸素濃度の制御と同様に、水質調整タンクに設けるバブリングノズルからヘリウムガスまたは水素ガスをバブリングすることにより行うこととした。

##### (1) 水質調整タンク運転圧力の検討

溶存水素濃度の制御範囲「数 ppb～1ppm」を満足させるため、水質調整タンクの運転圧力と水素注入に使用する水素ガスの濃度をパラメータとして、表 10 に示す系統仕様の比較を行った。また図 7 は、注入する水素ガス濃度と水中の飽和水素濃度の関係を水素分圧（運転圧力）毎にまとめたものであり、水素注入に低濃度の水素ガスを使用する場合、運転圧力を高くすることで、飽和水素濃度を高くすることが可能であることを示している。表 10において、水質調整タンク運転圧力を 7.5MPaG とした場合、低濃度の水素ガスを使用しても十分高い溶存水素濃度まで増加させることができるのである。一方、水質測定を行う場合、サンプリング水を減圧せねばならず、減圧によってサンプリング水中の溶存ガスが気泡化して脱気するため、水質が変化してしまうという難点がある。従って、水質測定の際にも水質の変化がないように、水質調整タンクの運転圧力を 0.1MPaG とし、水素注入に使用する水素ガスには、低圧の場合でも溶存酸素濃度を 1ppm まで到達させることができる水素濃度 40vol.% のヘリウム・水素混合ガスを使用することとした。

##### (2) 水素注入の計算

4.2 項に示す溶存酸素濃度の検討と同様に、バブリングによる気泡径をパラメータとして水素注入における物質移動速度を計算し、水中に溶存する水素濃度の時間変化との関係を求めた。計算に当たっては、式 (1) において、DAB を水中における水素の拡散係数 (= 9.6 × 10<sup>-5</sup> cm<sup>2</sup>/s)<sup>14)</sup> とし、また、水素注入に水素濃度 40vol.% のヘリウム・水素混合ガスを使用することから、式 (8)、式 (9) をそれぞれ次式に置き換えた。

$$C_{A1} = \frac{\alpha \cdot 0.4 \cdot P}{22400} \cdot \left( 1 - \frac{1}{e^{X \cdot t}} \right) \quad (8')$$

$$C_{DH} = \frac{\alpha \cdot 0.4 \cdot P \cdot M \times 10^6}{22400} \cdot \left( 1 - \frac{1}{e^{X \cdot t}} \right) \quad (9')$$

$$\text{ただし、 } X = \frac{2 \cdot t_c \cdot S \cdot N}{1 \times 10^6} \cdot \sqrt{\frac{D_{AB} \cdot v_d}{\pi \cdot d}}$$

ここで、 CDH : 溶存水素濃度 (H<sub>2</sub>-mg/H<sub>2</sub>O-l = ppm)

α : 水に対する水素の溶解度 (= 0.0161 H<sub>2</sub>-l/H<sub>2</sub>O-l, @1ata, 50°C)<sup>13)</sup>

M : 水素の分子量 (= 2.016 g/mol)

計算により求めた、気泡径と溶存水素濃度の時間変化の関係を図8に示す。この図は、溶存水素濃度0ppmの水中に気泡径0.7mmのヘリウム・水素混合ガスをバーピングすることにより、約45minで1ppm以上まで増加させることができることを示しており、溶存水素濃度の制御が可能であるという見通しを得た。

## 5. 水素使用に関わる安全性の検討

### 5.1 安全設計の方針

水環境制御装置の水質調整タンクにおいては、給水の溶存酸素濃度、溶存水素濃度またはECPなどを所定の試験条件に制御する過程で可燃性の水素ガス（ヘリウム・水素混合ガス）を使用する予定であることから、水素ガスの発火を防止して安全に使用するために、ヘリウム・水素混合ガスを水質調整タンクへ供給する設備に関する安全性の検討を行った。

安全性の検討を行うにあたり、関連法規である高圧ガス保安法の調査、既存の水素取扱施設における安全対策の調査などを行い、参考とした。

### 5.2 ヘリウム・水素混合ガス供給設備の法規上の取り扱いについて

ヘリウム・水素混合ガス供給設備に関する法規は高圧ガス保安法<sup>15)</sup>であるが、同法第3条第1項第7号により、原子炉等規制法の適用を受ける施設内における高圧ガスは適用除外とされている。高圧ガス保安法に準拠すると考えた場合でも、ヘリウム・水素混合ガス（以下、混合ガス）は減圧弁にて約0.5MPaまで減圧して使用するため、同法第2条（定義）の第1号の規定（「高圧ガスとは、常用の温度において圧力が1MPa以上となる圧縮ガスであって現にその圧力が1MPa以上であるもの又は温度35℃において圧力が1MPa以上となる圧縮ガス」）により、混合ガス供給設備から供給される混合ガスは高圧ガスに該当しない。また、同法第16条および第17条の2の規定（「容積300m<sup>3</sup>以上の高圧ガスを貯蔵するときは、あらかじめ都道府県知事の許可を受けて設置する第1種貯蔵所、または、あらかじめ都道府県知事に届け出て設置する第2種貯蔵所においてしなければならない」）により、最大20本のガスボンベ（容積：約140m<sup>3</sup>）を保管するボンベ室は高圧ガス貯蔵所に該当しない。

しかし、混合ガス供給設備の設計に際しては、高圧ガス保安法における技術上の基準を参考に、安全性の検討を行うこととした。

ここで、高圧ガス保安法における技術上の基準は、一般高圧ガス保安規則（一般則）に明記されており、混合ガス供給設備の設計に関すると考えられる条文の抜粋を以下に示す。

一般則第6条第1項第25号：可燃性ガス、毒性ガス又は酸素の液化ガスの貯槽に取り付けた配管には、当該貯槽の外面から5メートル以上離れた位置において操作することができる緊急遮断装置を設けること。

同項第31号：可燃性ガス又は毒性ガスの製造施設には、当該製造施設から漏えいするガスが滞留するおそれのある場所に、当該ガスの漏えいを検知し、かつ、警報す

るための設備を設けること。

同第 42 号二：充てん容器に係る容器置場（可燃性ガス及び酸素のものに限る。）には、不燃性又は難燃性の材料を使用した軽量な屋根を設けること。

同第 42 号六：可燃性ガスの容器置場は、当該ガスが漏えいしたとき滞留しないような構造とすること。

一般則第 6 条第 2 項第 8 号：容器置場及び充てん容器等は、次に掲げる基準に適合すること。

イ 充てん容器等は、充てん容器及び残ガス容器にそれぞれ区分して容器置場に置くこと。

ロ 可燃性ガス、毒性ガス及び酸素の充てん容器等は、それぞれ区分して容器置場に置くこと。

ハ 容器置場には、計量器等作業に必要な物以外の物を置かないこと。

ニ 容器置場の周囲 2 メートル以内においては、火気の使用を禁じ、かつ、引火性又は発火性の物を置かないこと。

ホ 充てん容器等は、常に温度 40 度以下に保つこと。

ヘ 充てん容器等には、転落、転倒等による衝撃及びバルブの損傷を防止する措置を講じ、かつ、粗暴な取扱いをしないこと。

ト 可燃性ガスの容器置場には、携帯電燈以外の燈火を携えて立ち入らないこと。

### 5.3 所内水素取り扱い施設における安全対策

原研所内で水素を取り扱っている施設の安全対策に関する調査を行い、参考とした。水素取り扱い施設（所内）の安全対策例を表 11 に示す。調査を行った各施設においては、いずれも可燃性ガス検知器による「水素濃度の監視」が行われるように考慮されている。また、「水素ガスの希釈」の他、J R R - 3 / 冷中性子源装置 (CNS : Cold Neutron Source) においては、水素を取り扱う設備本体を水中に設置する「空気の混入防止（爆鳴気生成の防止）」、排出ガスの水素濃度が既定値を超えた場合に水素排気を停止する「水素ガスの遮断」、酸素・水素反応の爆発による容器内圧の上昇を想定した「耐圧防爆構造の採用（全閉構造で、容器内部で爆発性ガスの爆発が起こった場合でも、容器がその圧力に耐え、かつ外部の爆発性ガスに引火するおそれのないようにした構造<sup>16)</sup>」、また、H T T R / 水素製造システム炉外試験装置においては、製造した水素ガスを即座に燃焼処分するなどの安全対策が施されている。

### 5.4 ヘリウム・水素混合ガス供給設備における安全対策

以上の関連法規および水素取り扱い施設における安全対策の調査結果に基づき、水環境制御装置の混合ガス供給設備における対応を検討した。

#### 5.4.1 安全対策の基本的な考え方

混合ガス供給設備における安全対策としては、高圧ガス保安法における技術上の基準に基づき、以下に示す「水素ガスの希釈」、「水素濃度の監視」および「水素ガスの遮断」という基本的な考え方を採用することとした。

## (1) 水素ガスの希釈

- ①供給する水素ガスには、不活性なヘリウムガスとの混合ガス(水素濃度：40vol.%)を使用する。
- ②水質調整タンク気相部の水素濃度は、空气中における水素の燃焼下限(4vol.%)未満となるように、常時管理する。
- ③混合ガスを貯蔵する施設を風通しの良い屋外に設置する。

## (2) 水素濃度の監視

- ①水質調整タンク気相部に水素濃度計を設置し、水素濃度を監視する。
- ②混合ガス供給配管の周辺に可燃性ガス検知器を設置し、水素濃度を監視する。

## (3) 水素ガスの遮断

- ①異常の際には混合ガスの供給を停止する。

## 5.4.2 具体的な設備対応

混合ガス供給設備の概要図を図 9 に示す。混合ガスは、ヘリウム・水素混合ガスボンベ室（以下、ボンベ室）から地下トレンチ、JMTR 炉室（地下 1 階）を経由してキューピクル内に設置される水質調整タンクへ供給される。

水素を使用する混合ガス供給系および水質調整タンクにおいて多重の安全性を確保するための対応策を以下に示す。

## (1) 混合ガス供給系（ボンベ室から水質調整タンクまで）

- ①ボンベ室は、混合ガスが滞留しないように風通しの良い片流れ式屋根構造として、屋外に設置し、混合ガスが漏えいした場合でも十分換気されるようにする。
- ②混合ガスは減圧弁にて約 0.5MPa まで減圧され、水質調整タンクへ供給される。減圧弁の故障などにより許容圧力を越えた混合ガスが供給されることを防ぐため、減圧弁の二次側には安全弁を設置する。
- ③混合ガス供給配管を布設する地下トレンチ、JMTR 炉室（地下 1 階）およびキューピクル内の天井付近には水素検知器を設置して混合ガスの漏えいを監視し、異常の際には、インターロックによりボンベ室内の遮断弁を閉止して混合ガスの供給を停止する。

## (2) 水質調整タンク

- ①水質調整タンクに混合ガスを注入する際には、自動的にタンク気相部にヘリウムガスが導入され、タンク気相部の水素濃度を 4vol.%未満に希釈する。
- ②水質調整タンクには水素濃度計を設置してタンク気相部の水素濃度を監視し、どのような状態においても 4vol.%未満であるように、混合ガス注入弁およびヘリウムガス注入弁を制御する。また、異常によりガス注入弁の制御ができず、タンク気相部の水素濃度が上昇してしまう場合には、インターロックによりボンベ室内の遮断弁を閉止して混合ガスの供給を停止する。

## 5.5 水素取り扱いに関する安全対策用品

混合ガス供給設備の運用に際して、安全性をより確実なものとするために以下に示す安全対策

用品を使用する。

(1) 可燃性ガス検知器（ハンディータイプ）

ガスボンベ交換後などに、配管接続部からの漏えいを調べるための小型検知器。

(2) 防爆工具

ガスボンベ交換の際などに使用する工具で、打撃や激しい摩擦によっても発火源となる火花を発生しないもの。日本碍子製のペアロン（防爆用ベリリウム銅合金工具）などがある。

(3) 静電気帯電防止作業服・作業靴

ガスボンベ交換の際などに着用する作業服および作業靴で、作業者の身体、作業服などに帯電する静電気を除去するもの。

## 6. まとめ

本設計検討では、水環境制御装置の水質調整系について、精製システム、溶存酸素濃度および溶存水素濃度の調整について検討を行い、以下の結果を得た。

(1) 精製システム

精製システムは、クラッド除去フィルタおよびイオン交換塔により構成し、精製の効率を高めるために給水の全量を精製することにより、キャップセルへ供給する水の水質調整および制御の目標値を満足させることができることである。

なお、クラッド除去フィルタは、フィルタエレメントにろ過性能  $0.45 \mu\text{m}$ （捕集効率：99%以上）の中空糸膜を採用し、逆洗が可能な構造とする。また、イオン交換塔には、混床・非再生方式を採用するとともに、イオン交換樹脂には、硫酸イオンの溶出が少なく、BWR および JMTR における使用実績の高いものを採用し、樹脂の充填量は  $40\ell$ 、樹脂充填部のサイズは  $\phi 250\text{mm} \times H800\text{mm}$  を目安とする。

(2) 溶存酸素濃度の調整

溶存酸素濃度の調整は、ヘリウムガスのバーリングによる酸素脱気あるいは酸素ガスのバーリングによる酸素注入により行う。バーリングにより発生する気泡と水の間で起こる気体拡散計算の結果、直径  $0.7\text{mm}$  のヘリウム気泡を用いることによりバーリング開始から約 6 分で目標下限である数 ppb に、また、直径約  $1\text{mm}$  の酸素気泡を用いることによりバーリング開始から約 15 秒で目標上限である  $200\text{ppb}$  に達成可能であることがわかった。

(3) 溶存水素濃度の調整

水質測定の際にも水質の変化がないように水質調整タンクの運転圧力を  $0.1\text{MPaG}$  とした場合においても、水素注入のために使用する水素ガスに水素濃度  $40\text{vol.\%}$  のヘリウム・水素混合ガスを使用することより、溶存酸素濃度を  $1\text{ppm}$  まで到達させることができる。

また、溶存水素濃度の調整は、溶存酸素濃度の調整と同様に、ヘリウムガスまたは水素濃度  $40\text{vol.\%}$  のヘリウム・水素混合ガスをバーリングすることにより行う。気泡と水の間の気体拡散計算の結果、直径約  $0.7\text{mm}$  の水素気泡を用いることによりバーリング開始から約 45

分で目標上限である 1ppm に到達可能であることがわかった。

さらに、水素使用に関わる安全性についても検討を行った。その結果、高圧ガス保安法における技術上の基準などに基づいた設備対応を行うことにより、十分な安全性が確保できることがわかった。

本設計検討の結果は、水環境制御装置の製作、設置に反映される予定である。

## 謝　　辞

本設計検討にあたり、材料試験炉部 横川誠氏、小山昇氏、熊原肇氏、横内猪一郎氏、元 同部、現 大洗研究所保安管理室保安管理課 池島義昭氏、水越昇氏、エネルギーシステム研究部複合環境材料研究グループ 加治芳行氏、宇賀地弘和氏の皆様には、ご協力頂きました。

また、研究炉部 J R R - 3 管理課 鈴木正年氏、元 核熱利用研究部高温機器開発試験室、現 原子力発電技術機構出向 宇野久男氏、管理部プルトニウム技術開発室 黒澤誠氏、(株)巴商会 東海営業所 平井明広氏の皆様には、水素使用に関わる安全性についての情報・資料をご提供頂きました。

また、本報告書の作成にあたり、材料試験炉部 部長 高橋秀武氏、次長 伊藤治彦氏、次長 藤木和男氏、同部ホットラボ課 課長代理 斎藤順市氏、同部照射第1課 課長 小森芳廣氏、課長代理 板橋行夫氏、松井義典氏、エネルギーシステム研究部複合環境材料研究グループリーダー 辻宏和氏の皆様には、ご助言、ご指導を賜りました。

ここに記して深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 日本原子力学会編, 原子炉水化学ハンドブック (2000)
- 2) 日本原子力学会「原子炉水化学」研究専門委員会編, 原子力発電プラントの水化学管理の実績と将来展望 (1995)
- 3) ステンレス協会編, ステンレス鋼便覧 第3版, p.269 (1995)
- 4) T.M.Karlsen : Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking (IASCC) Studies: In-pile Crack Growth Measurements in IFA-586, HWR-359 (1993)
- 5) (株)クラレ, S F - 8 1 0 8 A技術データ (1996)
- 6) オルガノ(株), イオン交換樹脂とその技術と応用 (実用編), pp.207-211 (1997)
- 7) オルガノ(株), イオン交換樹脂アンバーライト総合カタログ (2000)
- 8) 三菱化学(株), DIAION 総合カタログ (2000)
- 9) 原研, 原子炉第1課, 私信
- 10) 大橋健也, 本田卓, 横村栄二, 古谷保正: 防食技術, 37, pp.198-204 (1988)
- 11) 平岡正勝, 田中幹也: 移動現象論, 朝倉書店, pp.113-115 (1971)
- 12) Bird, Stewart, Lightfoot : Transport Phenomena, John Wiley & Sons. INC., p.505,p.744 (1960)
- 13) 日本機械学会, 技術資料 流体の熱物性値集 (1983)
- 14) 化学工学会編, 化学工学便覧 改訂5版 (1994)
- 15) 高圧ガス保安協会編, 新版 高圧ガス保安法規集 (2000)
- 16) 労働省産業安全研究所, 技術指針 工場電気設備防爆指針 (ガス蒸気防爆 1979) (1979)

表1 国内BWRの代表的な水質管理値〔原子炉水の水質管理値(例)〕<sup>1)</sup>

管理項目	管理値
導電率 [μS/cm]	<1
pH (at 25°C)	5.6~8.6
塩素イオン [mg/l]	<0.1
硫酸イオン [mg/l] *	<0.1
シリカ [mg/l]	<5

\* : 改良沸騰水型軽水炉 (ABWR : Advanced Boiling Water Reactor)  
における管理項目

表2 国内BWRの代表的な水質管理値〔給水の水質管理値(例)〕<sup>1)</sup>

管理項目	管理値
溶存酸素* [μg/l]	20~200
金属(Fe,Cu,Ni,Cr)不純物 [μg/l]	<15
全銅(Cu) [μg/l]	<2

表3 OECD Halden Reactor Project 高温高压水ループ（BWR 条件）における水質<sup>4)</sup>

	IFA-586 Feed water	IFA-586 Outlet from Test Section	IFA-586 NWC*	IFA-586 HWC**
導電率 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	0.05	0.1	<0.15	<0.1
$\text{SO}_4^{2-}$ (ppb)	0.5	1.4	<20	<20
$\text{NO}_3^-$ (ppb)	0.3	1.0	—	—
$\text{Cl}^-$ (ppb)	—	—	<20	<20
$\text{SiO}_2$ (ppb)	<10	<10	<100	<100
$\text{CrO}_4^{2-}$ (ppb)	n.d	24	—	—
Ni(ppb)	n.d	15	—	—
Fe(ppb)	<1	<1	—	—
Cu(ppb)	—	—	<1	<1
金属イオン (ppb)	—	—	<15	<15
溶存酸素 (ppb)	—	—	200~300	0~20
溶存水素 (ppb)	—	—	25~35	up to ppm level
ECP*** (mV <sub>SHE</sub> )	—	—	+250 (Target)	-300 (Target)
備考	n.d : not detected			

\*: 標準水化学条件 (Normal Water Chemistry)

\*\*: 水素水化学条件 (Hydrogen Water Chemistry)

\*\*\*: 腐食電位 (Electrochemical Potential)

表4 水環境制御装置における給水の水質調整・制御項目および目標値

パラメータ		目標値	調整・制御の目的
調整項目	導電率	$\leq 0.1 \mu\text{S}/\text{cm}$	水の純度の管理
	pH	5.5~7.0	腐食加速因子の抑制
	塩素イオン ( $\text{Cl}^-$ )	<10ppb	SCC*加速因子の抑制
	硫酸イオン ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	<5ppb	SCC 加速および SCC 亀裂伝ば速度増大因子の抑制
	腐食電位 (ECP)	-400 mV <sub>SHE</sub> ~+200mV <sub>SHE</sub>	IASSCC に関する水質条件のうちの主要なパラメータの調整
制御項目	全有機炭素 (TOC)	<50ppb	腐食影響因子の抑制 (樹脂の選定に当たって考慮)
	溶存酸素	数 ppb~200ppb	腐食抑制効果および応力腐食割れ感受性への影響因子の制御
	溶存水素	最大 1ppm	溶存酸素濃度および ECP の低減効果への影響因子の制御

\* : 応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking)

表 5 水環境制御装置における水質測定方法

測定点	温度・圧力区分	測定方法	測定項目 (測定方式／分析方法)
補給水タンク出口 水質調整タンク出口	低温・低圧	インライン測定 (連続測定)	導電率 (交流 2 極式)
			pH (ガラス電極式)
			溶存酸素、溶存水素 (隔膜ポーラログラフ電極式)
サンプリングライン	低温・低圧	インライン測定 (系統毎切替測定)	導電率 (交流 2 極式)
			pH (ガラス電極式)
			溶存酸素、溶存水素 (隔膜ポーラログラフ電極式)
サンプリングライン (測定セル)	高温・高圧	インライン測定* (系統毎切替測定)	導電率 (白金 4 電極式)
			pH (Y 安定ジルコニア電極式)
			腐食電位 (ECP) (試料極 SUS304 および Alloy182, Ag/AgCl 参照電極式)
			レドックス電位 (白金電極式)
イオン交換塔出口	低温・低圧	インライン測定 (連続測定)	導電率 (交流 2 極式)
補給水タンク出口 クラッド除去フィルタ入口 サンプリングライン	低温・低圧	サンプリング測定	塩素イオン ( $\text{Cl}^-$ )、硫酸イオン ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) (イオンクロマトグラフ など)
			クラッド、その他 (ICP 発光分析 など)

\* : Cormet 社製 “TrendChem” 高温水化学モニタリングシステムによる測定

表 6 水環境制御装置におけるインライン測定用水質計の仕様

測定対象	メーカ	形式	測定範囲	測定液流量 (推奨値)
導電率 (低温・低圧用)	東亜DKK(株)	導電率計 : CDIC-1 電導度セル : CED-31442	0~20 $\mu\text{S}/\text{cm}$	0.05~2ℓ/min
導電率 (高温・高圧用)	Cormet 社	TrendChem	0.05~ 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$	0.2~10ℓ/min
pH (低温・低圧用)	東亜DKK(株)	pH計 : HDIC-4 ガラス電極 : HG-324A 比較電極 : HC-324A	pH 0~14	0.15~ 0.2ℓ/min
pH (高温・高圧用)	Cormet 社	TrendChem	pH 3~11	0.2~10ℓ/min
溶存酸素濃度 (低温・低圧用)	東亜DKK(株)	溶存酸素計 : DODI-1 溶存酸素電極 : OE-5834	0~20mg/ℓ (0~20ppm)	0.2~2ℓ/min
溶存水素濃度 (低温・低圧用)	東亜DKK(株)	溶存酸素計 : DHDI-1 溶存酸素電極 : HE-5322	0~10mg/ℓ (0~10ppm)	0.2~2ℓ/min
ECP (高温・高圧用)	Cormet 社	TrendChem 試料電極 参照電極	-1200mV~ +200mV	0.2~10ℓ/min

表 7 各種フィルタの特徴、適用実績および評価

形式	特徴 <sup>1) 2)</sup> (○:長所/×:短所)	適用実績 <sup>1) 2)</sup>	評価
中空糸膜フィルタ	・ろ過面積が大きい(○) ・2次廃棄物の発生が少ない(○) ・ろ過性能が優れている(○) ・逆洗が容易に行える(○)	国内BWR一次系 (復水浄化系など)	優
プリコート形フィルタ	・イオン除去も可能(○) ・2次廃棄物[スラッジ]が発生する(×)	国内BWR一次系 (炉水浄化系など)	良
プリーツ形フィルタ	・ろ過面積が大きく、安価(○) ・交換のサイクルが短い(×)	国内BWR実績なし (試験装置など)	可
金属フィルタ	・耐熱性に優れている(○) ・捕集可能粒径が大きい*(×)	国内実績なし (海外PWRなど)	可
電磁フィルタ	・耐熱性に優れている(○) ・クラッドの磁性により除去性能が変化する(×) ・電源が必要(×) ・高価(×)	国内BWR実績なし (試験装置など)	不可

\*: 中空糸膜フィルタとの比較による

表 8 代表的なイオン交換樹脂の特性、使用実績<sup>1) 7) 8) 9)</sup>

商標／銘柄 (メーカー)		特性				使用実績
		交換容量 (meq/ml)**	架橋度 (%)	水 分 (%)	有効径 (mm)	
陽イオン交換樹脂	Amberlite/IR120B (Rohm & Haas 社)	2.0	8	44~48	0.45~0.60	国内 BWR 一次系 (復水脱塩装置など) JMTR (ホールカル循環系) (OWL-1, -2 など)
	Diaion/SK1B (三菱化学(株))	2.0	8	43~50	0.4~0.6	国内 BWR 補給水系 (脱塩装置など) JMTR (精製系)
	Dowex/HCR-W2 (Dow Chemical 社)	2.0	8	44~48	0.42~1.19	国内 BWR 一次系 (復水脱塩装置など)
陰イオン交換樹脂	Amberlite/IRA400J (Rohm & Haas 社)	1.4	-	43~49	0.50~0.60	国内 BWR 補給水系 (脱塩装置など) JMTR (ホールカル循環系) (OWL-1, -2 など)
	Diaion/SA10A (三菱化学(株))	1.3	-	43~47	0.4~0.6	国内 BWR 補給水系 (脱塩装置など) JMTR (精製系)
	Dowex/SBR-P (Dow Chemical 社)	1.2	-	50~57	0.42~1.19	国内 BWR 一次系 (復水脱塩装置など)

\*\* : mg 当量/ml-膨潤樹脂

表 9 JMTR の主な純水精製設備における空間速度 (SV)

設備名 (精製装置)	JMTR 精製系		OWL-1 (混合型) *	OWL-2 (混合型) *	OSF-1 (混合型) *
	K 塔	A 塔			
通水流量	25 (m³/h)	50 (m³/h)	180 (ℓ/h)	600 (ℓ/h)	600 (ℓ/h)
充填樹脂量	1 (m³)	2 (m³)	10 (ℓ)	30 (ℓ)	40 (ℓ)
SV (1/h)	25	25	18	20	15

\* : 陽イオン交換樹脂と陰イオン交換樹脂を 1 : 2 の割合で混合して使用

表 10 水質調整タンク運転圧力と水質調整用氷素ガス濃度による系統仕様の比較

水質調整タンク運転圧力	0.1 MPa			0.8 MPa	7.5 MPa
水質調整用ガス (氷素注入用)	He+H <sub>2</sub> (4vol.%)	He+H <sub>2</sub> (40vol.%)	H <sub>2</sub> (100vol.%)	He+H <sub>2</sub> (4vol.%)	He+H <sub>2</sub> (4vol.%)
溶存氷素飽和濃度 (@50°C)	0.12 ppm	1.16 ppm	2.89 ppm	0.52 ppm	4.45 ppm
溶存ヘリウム飽和濃度 (@50°C)	3.00 ppm	1.87 ppm	0 ppm	13.4 ppm	115 ppm
溶存氷素濃度が 1ppm まで到達可能であるか	×	○	○	△ (0.5ppm)	○
サンプリングによる 水質測定が可能であるか	○	○	○	×	×
比較項目 系統仕様の キャビセル内で ポイドが発生しないか	○	○	○	(溶存ヘリウムガスが 気泡として発生)	(溶存ヘリウムガスが 気泡として発生)
水素取扱上必要な安全対策	水質調整用ガス中の 水素濃度が燃焼下限 未満であるため、 特に不要	水質調整用ガス中の 水素濃度を 4% 部の水素濃度を 未満に管理する (10倍希釈) (2.5倍希釈)	水質調整タンク気層 水質調整用ガス中の 水素濃度を 4% 部の水素濃度を 未満に管理する (10倍希釈) (2.5倍希釈)	水質調整用ガス中の 水素濃度が燃焼下限 未満であるため、 特に不要	水質調整用ガス中の 水素濃度が燃焼下限 未満であるため、 特に不要
評価 (順位)	5	1	2	4	3

表 11 水素取扱施設（所内）の安全対策例

施設・設備名	HTR／ 水素製造システム炉外試験装置	Ar-H <sub>2</sub> 混合ガス供給装置／ 燃料研究棟／ Ar-H <sub>2</sub> 混合ガス供給装置	JRR-3／ 冷中性子源装置 (CNS)	JMTR／ 水環境制御装置
設備概要	HTTR から の高温核熱を活用し た天然ガス(CH <sub>4</sub> )の水蒸気改質を より水素製造システムを炉外に て技術開発するための試験装置 である。	プルトニウムを取り扱うグローブ ボックスの雰囲気ガス(Ar)を精 製する装置の再生用ガス(Ar+H <sub>2</sub> ) を供給するための装置である。	原子炉からの熱中性子を液体水 素により減速して冷中性子を取 り出すための装置である。 (省略)	原料ガス : He+H <sub>2</sub> (40%) 運転状態 : He+H <sub>2</sub> (40%) (水中)ブリッジ
水素取扱状態	原料ガス : 天然ガス (CH <sub>4</sub> ) 製造ガス : H <sub>2</sub> 排出状態 : H <sub>2</sub> をフレアスタック で燃焼後、大気放出	原料ガス : 液体 Ar、H <sub>2</sub> 運転状態 : Ar+H <sub>2</sub> (8%以下)	原料ガス : H <sub>2</sub> 運転状態 : 液体 H <sub>2</sub>	原料ガス : He+H <sub>2</sub> (40%) 運転状態 : He+H <sub>2</sub> (40%) (水中)ブリッジ
適用法規・他	○高圧ガス保安法 (特定設備) ○(社)産業安全技術協会 (タンクの防爆構造認可)	○高圧ガス保安法 (貯蔵) ○労働安全衛生法 第二種圧力容器 (混合タンク)	○原子炉等規制法 (設置変更許可) ○労働安全衛生法 第二種圧力容器 (水素緩衝タンク)	○原子炉等規制法 (設工認相当) ○労働安全衛生法 第二種圧力容器 (水質調整タンク)
安全対策	水素取扱 タンクの 構造等 水素の処理 方法等	水蒸気改質器 ・防爆構造 (認可品) ・爆発性ガスが接する可能性の あるタンク表面温度を所定の 温度以下とする。 ・製造したH <sub>2</sub> を貯蔵にフレアス タックで燃焼処分する。また、 フレアスタックが失火した場 合には、炉外試験装置を停止 する。 ・機器周辺に可燃性ガス検知器 を設置する。 水素濃度の 監視等	混合タンク ・第二種圧力容器 ・耐圧防爆構造 ・混合タンクにて Ar+H <sub>2</sub> (8%以 下)の混合ガスを生成 (希釈) する。	水質調整タンク ・第二種圧力容器 ・酸素・水素反応を想定し、爆 発による内圧の上昇に耐えう る容器肉厚を探用している。 ・H <sub>2</sub> 排気の際には、N <sub>2</sub> にて 4% 以下まで希釈する。また、排 気系には回転機器などを使用 していない。 ・排出ガスのH <sub>2</sub> 濃度を監視し、 規定値を超えた場合には H <sub>2</sub> 排 気を自動停止する。 ・設備本体を水中に設置し、空 気の混入を防止している。 ・自動弁の駆動用ガスには N <sub>2</sub> を 使用している。

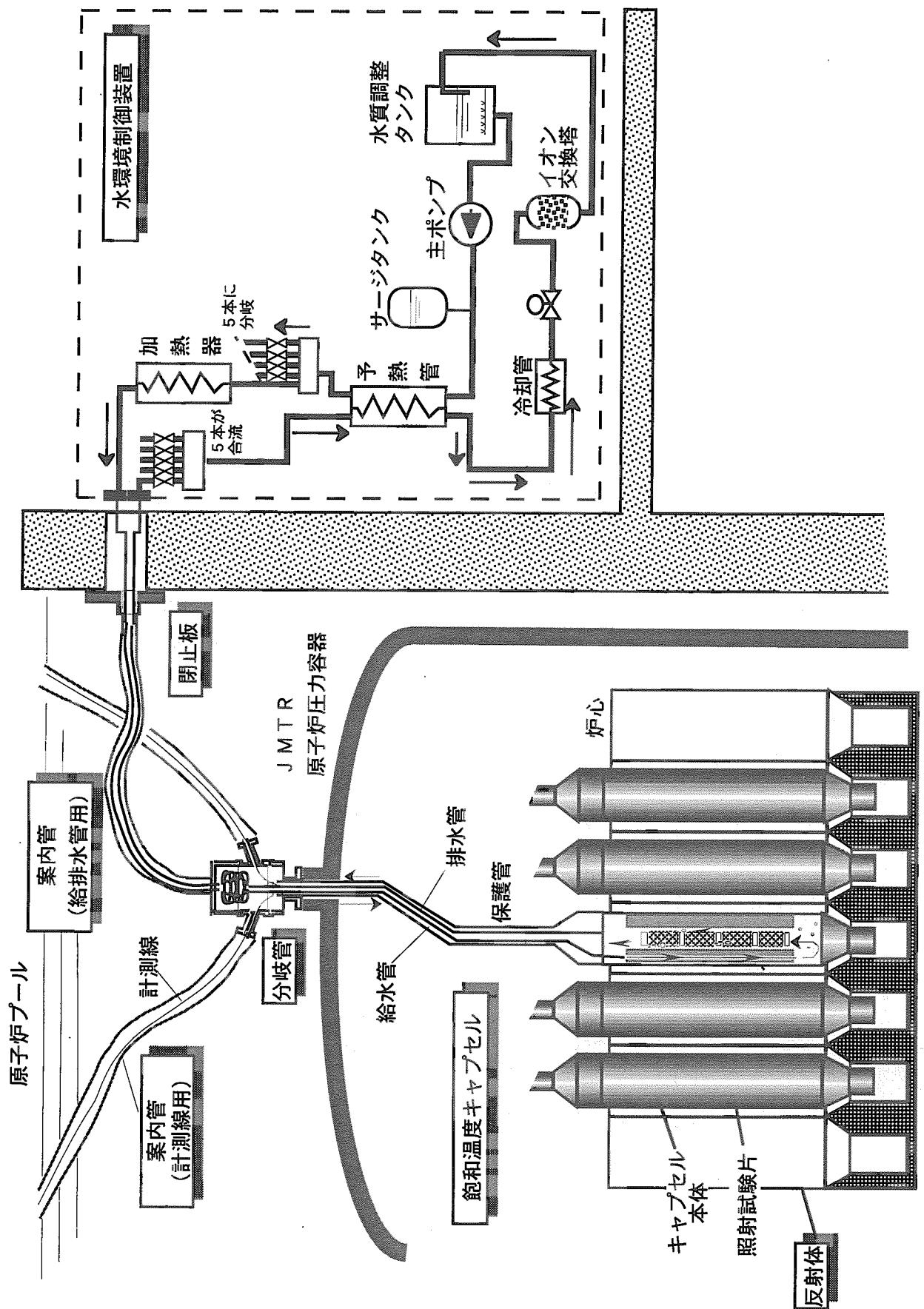


図1 高度材料環境照射装置 概要図

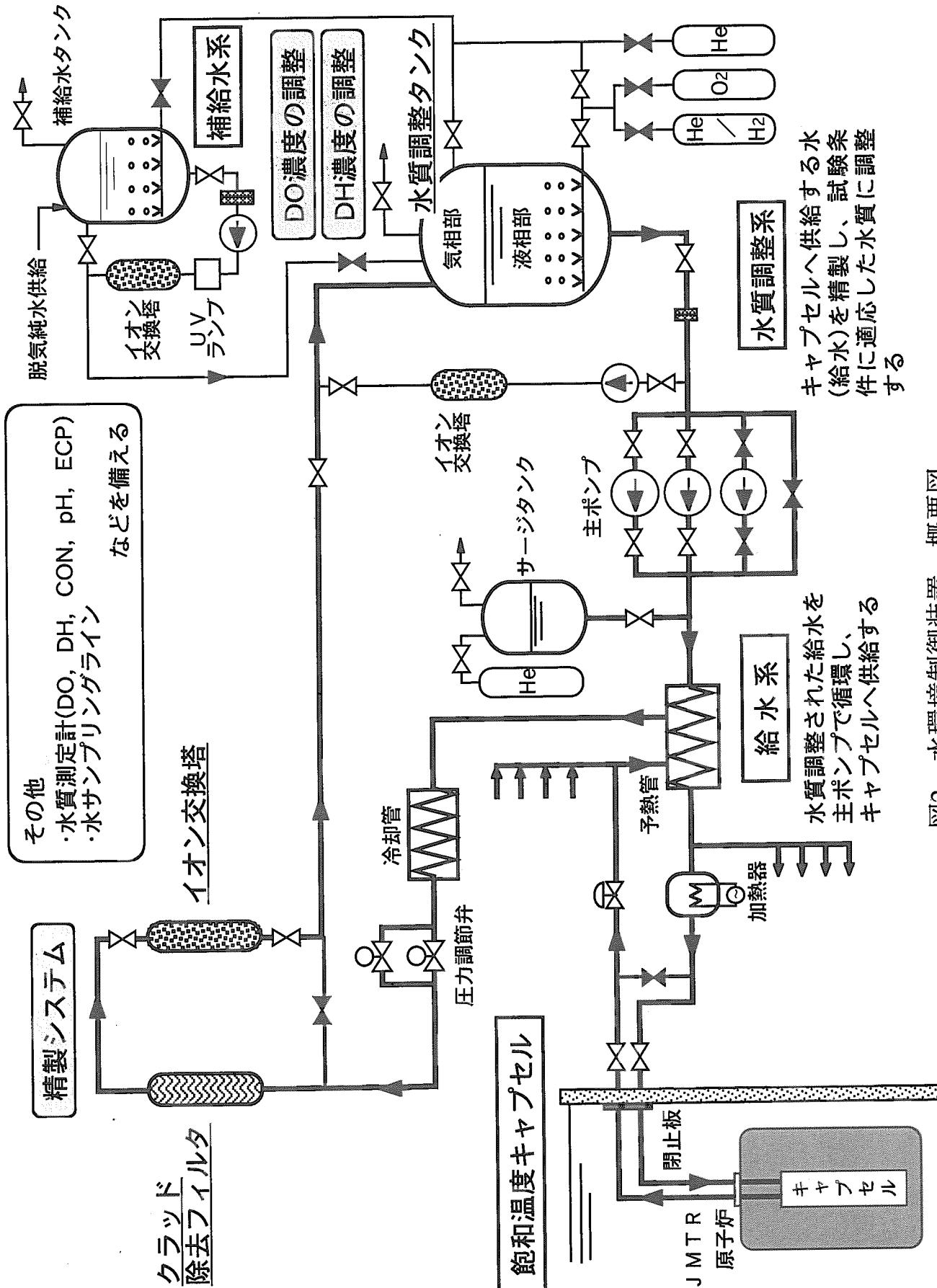
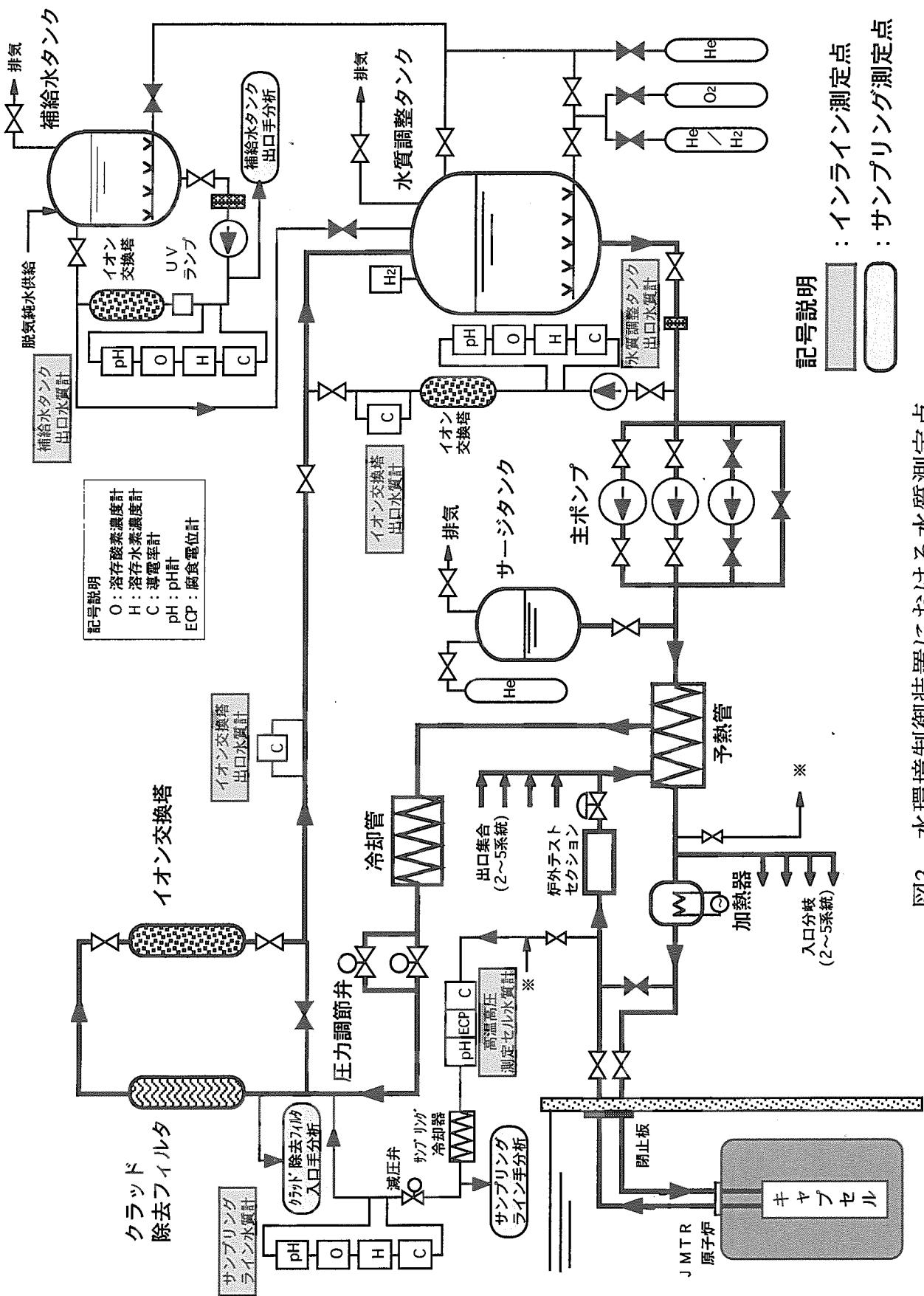
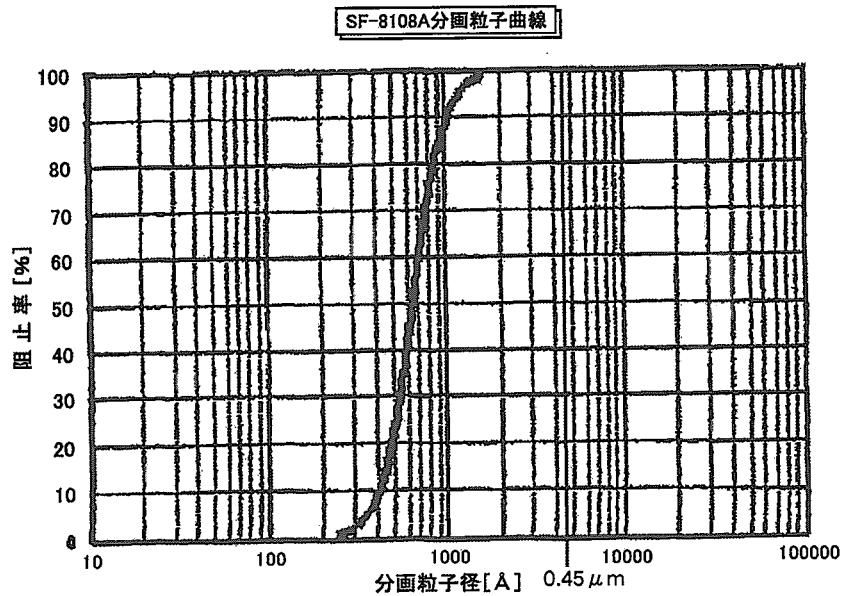


図2 水環境制御装置 概要図



図4 中空糸膜モジュールの性能曲線<sup>5)</sup>单一気泡の物質移動速度

$$N_{Am} = 2 \sqrt{\frac{D_{AB} \cdot v_d}{\pi \cdot d}} \cdot (C_{A0} - C_{A1})$$

気泡の上昇速度

$$v_d = \sqrt{\frac{g \cdot d}{0.45}}$$

ここで、

- $N_{Am}$  : 物質移動速度
- $D_{AB}$  : 気体拡散係数
- $v_d$  : 気泡の上昇速度
- $d$  : 気泡の直径
- $C_{A0}$  : 気泡界面の気体濃度
- $C_{A1}$  : 水中の気体濃度
- $g$  : 重力加速度

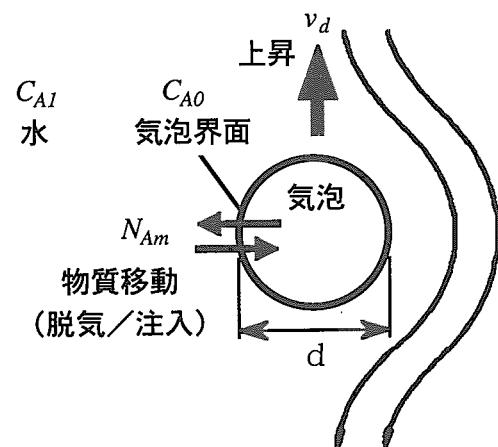
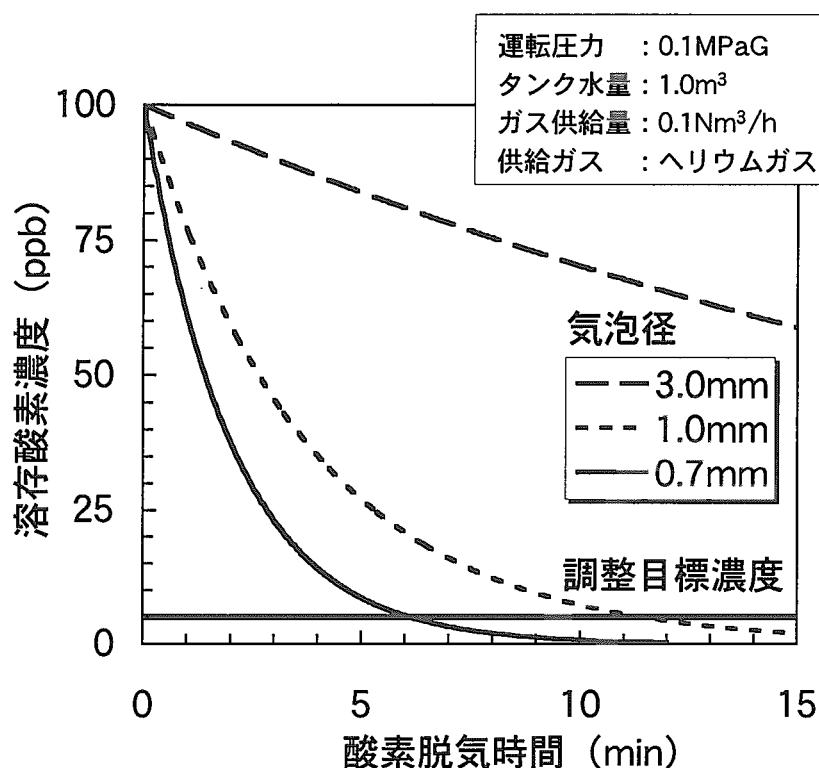
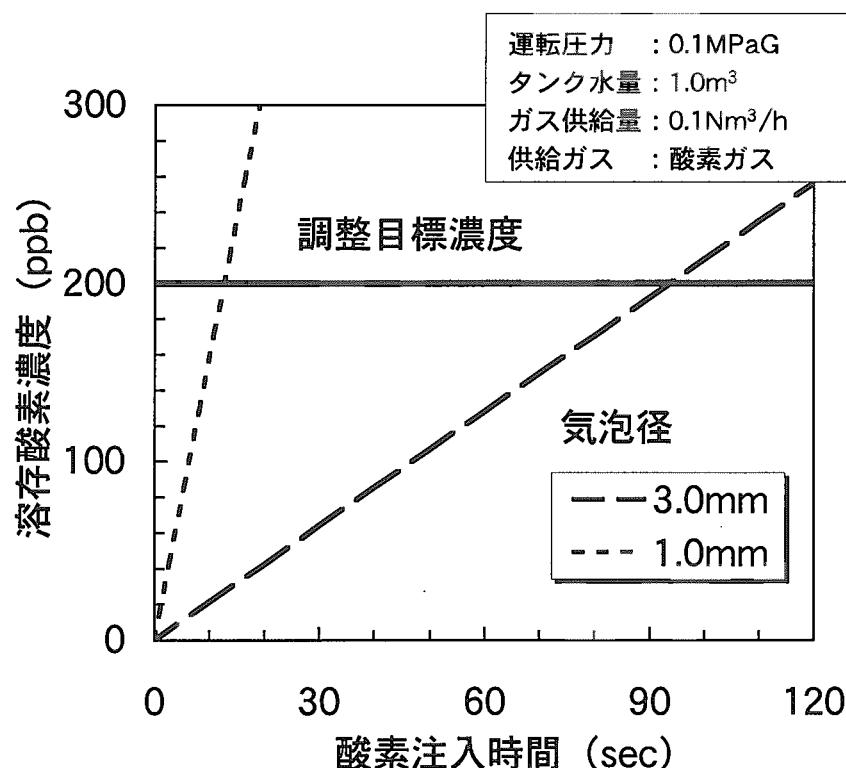
1個の気泡に着目

図5 気泡と水の間の気体拡散モデル



(a) ヘリウムバーリング（酸素脱氣）の場合の変化



(b) 酸素バーリング（酸素注入）の場合の変化

図6 バーリングによる気泡径と溶存酸素濃度の時間変化の関係

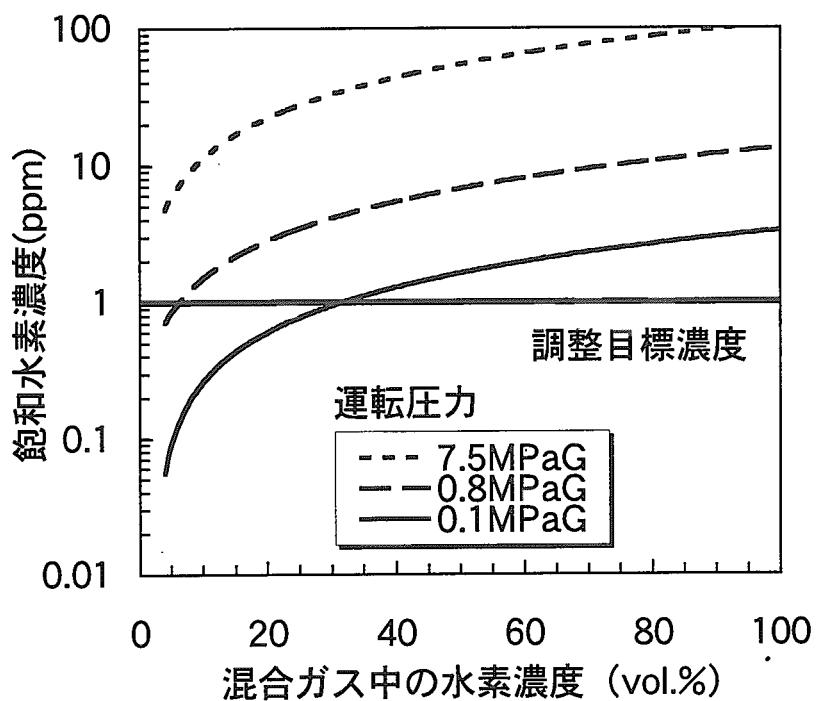


図7 注入する混合ガス中の水素濃度と水中の飽和水素濃度の関係

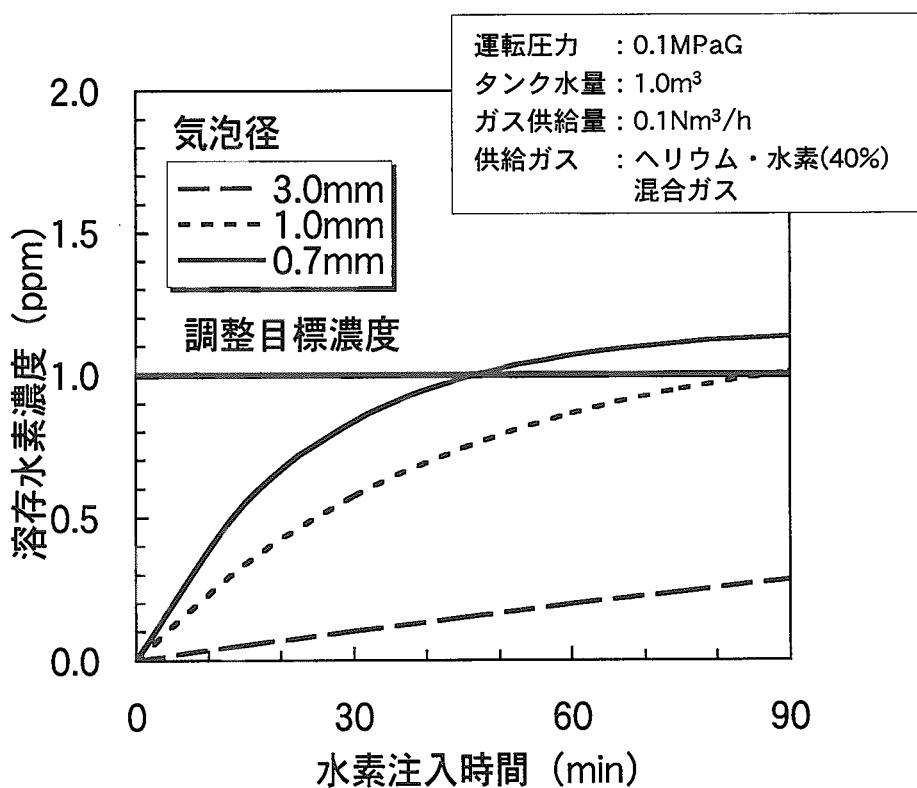


図8 バブルリングによる気泡径と溶存水素濃度の時間変化の関係

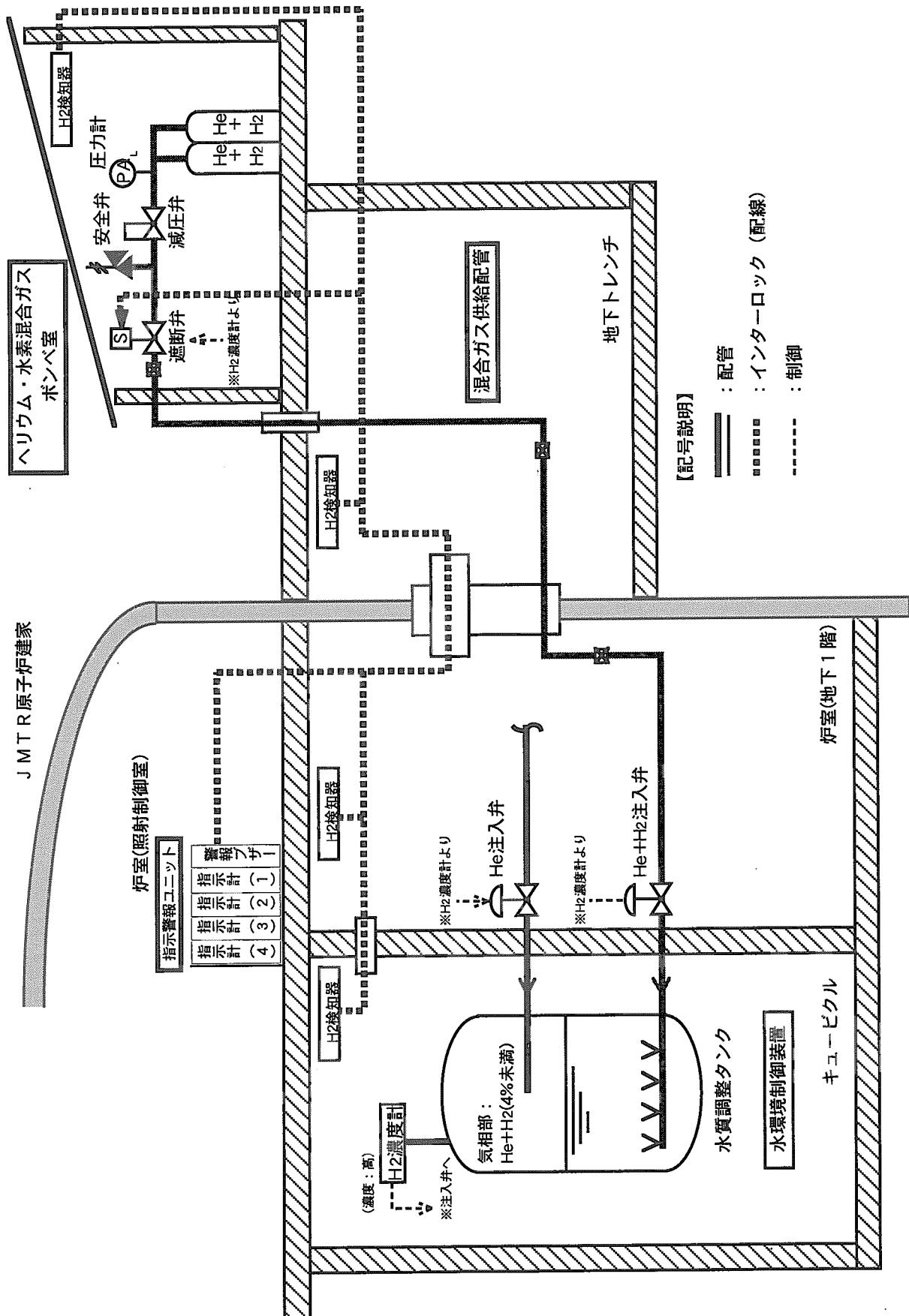


図9 ヘリウム・水素混合ガス供給設備 概要図

## 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	$s^{-1}$
力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
圧力、応力	パスカル	Pa	$N/m^2$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
工率、放射束	ワット	W	$J/s$
電気量、電荷	クーロン	C	$A \cdot s$
電位、電圧、起電力	ボルト	V	$W/A$
静電容量	ファラード	F	$C/V$
電気抵抗	オーム	$\Omega$	$V/A$
コンダクタンス	ジーメンス	S	$A/V$
磁束	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
磁束密度	テスラ	T	$Wb/m^2$
インダクタンス	ヘンリー	H	$Wb/A$
セルシウス温度	セルシウス度	$^{\circ}C$	
光束照度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
放射能	ルクス	lx	$lm/m^2$
吸収線量	ベクレル	Bq	$s^{-1}$
線量当量	グレイ	Gy	$J/kg$
	シーベルト	Sv	$J/kg$

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, L
ト	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	$\text{\AA}$
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レンチゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
$10^{18}$	エクサ	E
$10^{15}$	ペタ	P
$10^{12}$	テラ	T
$10^9$	ギガ	G
$10^6$	メガ	M
$10^3$	キロ	k
$10^2$	ヘクト	h
$10^1$	デカ	da
$10^{-1}$	デシ	d
$10^{-2}$	センチ	c
$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{-6}$	マイクロ	$\mu$
$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{-12}$	ピコ	p
$10^{-15}$	フェムト	f
$10^{-18}$	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N( $=10^3$ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.4822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa( $=10$ bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	$7.50062 \times 10^3$	145.038
0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233	
0.101325	1.03323	1	760	14.6959	
$1.33322 \times 10^{-4}$	$1.35951 \times 10^{-3}$	$1.31579 \times 10^{-3}$	1	$1.93368 \times 10^{-2}$	
$6.89476 \times 10^{-3}$	$7.03070 \times 10^{-2}$	$6.80460 \times 10^{-2}$	51.7149	1	

エネルギー・仕事・熱量	J( $=10^7$ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
1	0.101972	$2.77778 \times 10^{-7}$	0.23889	$9.47813 \times 10^{-4}$	0.737562	$6.24150 \times 10^{18}$		$= 4.184 \text{ J} \quad (\text{熱化学})$
9.80665	1	$2.72407 \times 10^{-6}$	2.34270	$9.29487 \times 10^{-3}$	7.23301	$6.12082 \times 10^{19}$		$= 4.1855 \text{ J} \quad (15^{\circ}\text{C})$
$3.6 \times 10^6$	$3.67098 \times 10^5$	1	$8.59999 \times 10^5$	3412.13	$2.65522 \times 10^6$	$2.24694 \times 10^{25}$		$= 4.1868 \text{ J} \quad (\text{国際蒸気表})$
4.18605	0.426858	$1.16279 \times 10^{-6}$	1	$3.96759 \times 10^{-3}$	3.08747	$2.61272 \times 10^{19}$	仕事率 1 PS(仮馬力)	
1055.06	107.586	$2.93072 \times 10^{-4}$	252.042	1	778.172	$6.58515 \times 10^{21}$	$= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$	
1.35582	0.138255	$3.76616 \times 10^{-7}$	0.323890	$1.28506 \times 10^{-3}$	1	$8.46233 \times 10^{18}$	$= 735.499 \text{ W}$	
$1.60218 \times 10^{-19}$	$1.63377 \times 10^{-20}$	$4.45050 \times 10^{-26}$	$3.82743 \times 10^{-20}$	$1.51857 \times 10^{-22}$	$1.18171 \times 10^{-19}$	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
1	$2.70270 \times 10^{-11}$	1	1	100	
$3.7 \times 10^{10}$	1		0.01	1	

照射線量	C/kg	R
1	3876	
$2.58 \times 10^{-4}$	1	

線量当量	Sv	rem
1	100	
0.01	1	

(86年12月26日現在)

—ASCC照射試験のための水質調整系に関する設計検討

R100

古紙配合率100%  
白色度70%再生紙を使用しています。