JAEA-Technology
2012-007

# JMTR照射設備の整備概要

Outline of New Irradiation Facility in JMTR

高橋 澄　塙 博　小沼 勇一　細川 甚作
菅野 勝

Kiyoshi TAKAHASHI, Hiroshi HANAWA, Yuichi ONUMA, Jinsaku HOSOKAWA
and Masaru KANNO

大洗研究開発センター
照射試験炉センター
材料試験炉部

Department of JMTR
Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center

March 2012

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構　研究技術情報部　研究技術情報課
〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

JAEA-Technology 2012-007

# ＪＭＴＲ照射設備の整備概要

日本原子力研究開発機構　大洗研究開発センター
照射試験炉センター　材料試験炉部

高橋　澄、塙　博、小沼　勇一、細川　甚作、菅野　勝

（2012 年 2 月 7 日　受理）

材料試験炉は、1968 年 3 月に初臨界を達成して以来、原子炉の燃料材料の耐久性、健全性の試験や基礎研究、ラジオアイソトープの製造等に利用されてきた。2006 年 8 月の第 165 サイクルの運転をもって一旦停止し、平成 24 年度からの再稼働に向けて原子炉機器の一部更新及び照射設備の整備を進めている。

現在、高燃焼度燃料の出力急昇試験設備、IASCC 研究のための材料照射試験装置の据付が完了したところである。その他、水力ラビット照射設備については保守点検を実施した。

本報告書は 2011 年までに JMTR に据え付けが完了した照射装置等の整備状況についてまとめたものである。

大洗研究開発センター：〒311-1393　茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

# Outline of New Irradiation Facility in JMTR

Kiyoshi TAKAHASHI, Hiroshi HANAWA, Yuichi ONUMA
Jinsaku HOSOKAWA and Masaru KANNO

Department of JMTR
Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received February 7, 2012)

The Japan Material Testing Reactor(JMTR), achieving first criticality in March 1968, has been used in testing the durability and integrity of reactor fuels and components, basic nuclear research, the production of radioisotopes, and other purposes. The JMTR, however, stopped in August 2006 after its 165$^{th}$ operation cycle, and is currently under going partial renewal of reactor facilities and installation of new irradiation facilities, geared toward being restarted in 2012.

Now, the installation of two new irradiation facilities under the LWR irradiation environment were finished until2011F.Y.

One is a power ramping test facility of high-burnup fuel. Another one is a material irradiation facility for IASCC research under the LWR irradiation environment. And another irradiation facility (Hydraulic rabbit irradiation facility) maintenance is carried out on2011F.Y.

This report is described the installed new irradiation facilities and established irradiation facility untill 2011F.Y. in JMTR.

Keywords : New Irradiation Facility, Power Ramping Test Facility, IASCC, Material Irradiation Facility

# 目　次

1. はじめに ····· 1
2. 照射設備の概要 ····· 1
2.1 燃料照射試験装置 ····· 1
2.1.1 機器整備の目的と機能 ····· 2
2.2 材料照射試験装置 ····· 7
2.2.1 BWR 用照射環境制御装置の系統仕様 ····· 7
2.2.2 主な機器の機能と設計上の留意点 ····· 8
2.2.3 改良型加熱器の特徴 ····· 11
3. 水力ラビット照射装置 ····· 12
4. 照射キャプセル温度制御装置 ····· 12
5. まとめ ····· 14
謝　辞 ····· 14
参考文献 ····· 14

# Contents

1. Introduction ····· 1
2. Outline of irradiation facility ····· 1
2.1 Fuel irradiation test facility ····· 1
2.1.1 Purpose and function of facility maintenance ····· 2
2.2 Material irradiation test facility ····· 7
2.2.1 System specification of irradiation environmental control system for BWR ····· 7
2.2.2 The main performance of facility and note in design ····· 8
2.2.3 Feature of advanced new heater ····· 11
3. Hydraulic rabbit irradiation facility ····· 12
4. Capsule temperature control system ····· 12
5. Summary ····· 14
Acknowledgements ····· 14
References ····· 14

This is a blank page.

# 1. はじめに

燃料・材料照射試験に広く利用されてきた JMTR は、多くの利用者から国内で唯一の照射試験炉としての運転再開について強い要望を受け、平成 19 年度から JMTR を改修して再稼働することを決定し、本格的な改修工事に着手することとなった。照射設備の整備については、新たなニーズを積極的に開拓しつつ、JMTR を「我が国における長期的な軽水炉利用を支える研究基盤」と位置付け、当面、燃料・材料の照射試験装置の整備を中心に整備を行った。燃料照射試験装置では、高燃焼度燃料の安全評価、破損影響評価が行えるよう出力急昇試験設備の整備を行った。また、材料照射試験装置では、軽水炉の炉内構造物に関して、照射環境下における応力腐食割れ評価に必要な中性子照射試験を実施するための装置の整備を行った。合わせてこれらの装置に使用するキャプセルの技術開発を進めた。また、がんの診断薬に用いる医療用ラジオアイソトープ $^{99m}$Tc の親核種である $^{99}$Mo の製造を行うことを想定し、既存の水力ラビット照射装置の一部更新及び増設の検討、製作を行っているところである。

現在も新たな照射設備設置のための整備作業が引き続き行われているところであるが、本報告書では、完成した照射試験設備の整備状況を中心にまとめて報告するものである。

# 2. 照射設備の概要

照射設備の整備のうち、燃料・材料照射試験装置は JMTR の改修の期間と合わせて、経済産業省保安院からの受託を受けて、平成 20 年度の設計から開始し、平成 22 年度に終了する予定で作業を進めたが、東日本大震災で若干遅れ一部を残して平成 23 年に完了した。引き続き平成 24 年度完成する装置である PWR 条件の材料照射試験を可能とする「水化学用照射環境制御装置」を製作中である。

既設水力ラビット照射装置の整備については、これまでの RI の製造や、医療用ラジオアイソトープ $^{99m}$Tc の親核種である $^{99}$Mo の製造を行うことを想定し、主要な機器の保守点検を実施した。

## 2.1 燃料照射試験装置(以下、「出力急昇試験設備」という)

今回整備した出力急昇試験設備は、旧装置と同様、大別してキャプセル制御装置、ヘリウム-3 出力可変装置、OSF-1 冷却系、キャプセル交換機から構成されており、沸騰水キャプセルを装荷して出力急昇試験を実施するものある。今回は、これまで JMTR で実施してきた BWR 条件を模擬した出力急昇試験設備をベースに更なる高燃焼度燃料の試験や PWR 条件においても高燃焼度燃料の出力急昇試験が実施できるように装置側の新設、更新を行ったものである。

新たに製作した装置はキャプセル制御装置で、本装置は JMTR 炉室 1 階にあった既設装置を解体撤去し、110GWD/ton-U までの高燃焼度燃料の試験が行えるように新たに地下 1 階のコンクリートで囲まれたスペース（以下、「キュービクル」という）に新設したものである。更にヘリウム-3 出力可変装置の更新機器としてはトリチウムトラップの構造を変更し、従前使用していたトリチウムの吸着材であるトリチウムゲッター材をチタンスポンジからジルコニウムコバルト

に変更した。このジルコニウムコバルト材は 400℃以上で焼鈍化すると一度吸着したトリチウムを放出する性質があり再利用が可能である。またガス循環器については更新、その他の機器については保守点検や制御盤の更新を実施した。

これまで JMTR で使用されてきた出力急昇試験設備を Fig.2.1-1 に、新設・更新を行った現在の出力急昇試験設備を Fig.2.1-2 に示す。キャプセル制御装置フロー図を Fig.2.1-3 にヘリウム-3 出力可変装置フロー図を Fig.2.1-4 に示す。

### 2.1.1 機器整備の目的と機能

製作に当たっては、燃焼度（50GWD/t-U）の燃料から更なる高燃焼度（110GWD/ t-U）の燃料による出力急昇試験を実施可能にするために「核燃料物質の使用変更許可」を行うとともに、燃料破損時の線量評価*を行い周辺線量上昇対応や破損水処理の簡潔化が可能なようにキャプセル制御装置を設計した。また原子炉規制法及び核燃料物質の使用変更許可に基づき「設計及び工事の方法に認可申請」（以下、「設工認申請」という）を行い対応した。

(1) キャプセル制御装置（以下の機器名は Fig.2.1-3 参照）

①高圧給水ポンプ

高圧給水ポンプは、沸騰水キャプセル内へ高圧水を供給する。

・型式　：往復動型ダイヤフラム式
・数量　：2 台
・流体温度　：50℃
・流量　：10cm$^3$/sec（1 基当り最大）
・最高使用圧力　：17MPa[gauge]
・主要材質　：ステンレス鋼(接液部)

②循環ポンプ

貯留タンク貯留水中の核分裂生成物（FP）を除去するため、FP除去用イオン交換塔間を結ぶラインで循環運転を行う。

・型式　：往復動型ダイヤフラム式
・数量　：1 台
・流体温度　：50℃
・流量　：20cm$^3$/sec
・吐出圧力　：0.5MPa[gauge]
・主要材質　：ステンレス鋼(接液部)

③給水用イオン交換塔

沸騰水キャプセルから排出された供給水の不純物等を除去する。

・型式　：たて置円筒型
・数量　：2 台
・寸法　：外径φ89.1mm×高さ 1300mm
・流体温度　：50℃
・最高使用圧力　：0.5MPa[gauge]

・最高使用温度　　：50℃
・イオン交換樹脂　　：オルガノ製　アンバーライトIRN-150
・主要材質　　：ステンレス鋼

④排水用イオン交換塔

燃料試料の破損に伴い発生した核分裂生成物（FP）を除去する。

・型式　　：たて置円筒型
・数量　　：2 台
・寸法　　：外径φ60.5mm×高さ 1100mm
・流体温度　　：50℃
・最高使用圧力　　：0.5MPa[gauge]
・最高使用温度　　：50℃
・イオン交換樹脂　　：オルガノ製　アンバーライト IRN-150
・主要材質　　：ステンレス鋼
・遮へい材　　：鉛

⑤貯留タンク

沸騰水キャプセルから排出された供給水を一時的に貯留する。

・型式　　：たて置円筒型
・数量　　：2 台
・寸法　　：外径φ114.3mm×高さ 1080mm
・流体温度　　：50℃
・最高使用圧力　　：0.5MPa[gauge]
・最高使用温度　　：50℃
・主要材質　　：ステンレス鋼
・遮へい材　　：鉛

⑥給水タンク

供給水を一時的に貯留し、高圧給水ポンプへ給水する。

・型式　　：たて置円筒型
・数量　　：1 台
・寸法　　：外径φ267.4mm×高さ 1100mm
・流体温度　　：50℃
・最高使用圧力　　：0.5MPa[gauge]
・最高使用温度　　：50℃

⑦アキュムレータ

高圧給水ポンプによる給水流量の脈動を吸収する。

・型式　　：ブラダ式
・数量　　：2 台
・圧力調整ガス　　：$N_2$ガス
・流体温度　　：50℃

・最高使用圧力　　：17MPa[gauge]
　　：10MPa[gauge]
・最高使用温度　　：50℃
・特記事項　　：BWR と PWR の試験条件により、切り替えて使用する。

⑧放射線モニタ（水モニタ・ガスモニタ）

燃料試料の破損を検知するための水モニタを沸騰水キャプセル排水側に設置した。設置場所は、早期に燃料の破損検出が行えるよう炉プール貫通孔近傍に設けた。

また、キャプセル制御装置の排気系の一部をサンプリングするガスモニタを設けた。

⑧-1 水モニタ（NaI(Tl)検出器）

・数量　　：1 式
・測定放射線　　：γ線
・測定範囲　　：$1\times10^{-2}$～$1\times10^{5}S^{-1}$
・周囲温度　　：0℃～40℃（キュービクル内）
・測定対象　　：配管を流れる水に混入したFP及び放射化した金属イオンからの放射線を配管外部から計測する。
・その他　　：現場操作盤内の受信機側で指示、警報設定が行える。検出器は、コリメータ付き。

⑧-2 Ge 半導体検出器　　：Ge 半導体検出器を電気冷却器により冷却しながら、燃料試料の破損時に放出される核分裂生成物（FP）を連続測定し、核種同定を行うため水モニタのすぐ下流側に設置した。

・数量　　：1 式

⑧-3 ガスモニタ

・数量　　：1 式

⑨接続ボックス

燃料異常過渡試験キャプセル給排水管、計装配管、キャプセル計装機器配線を炉プール中で接続するための中継ボックスを炉プール内に設置した。

・型式　　：水密型
・数量　　：１式
・最高使用圧力　　：0.05MPa(外圧)
　　：0.3MPa(内圧)
・最高使用温度　　：35℃
・主要材質　　：ステンレス鋼
・接続可能なキャプセル本数　　：沸騰水キャプセル（3体分）
　　校正試験用ヒータキャプセル（1体分）

⑩配管、弁類

・最高使用圧力　　：17MPa[gauge]
・最高使用温度　　：50℃

・主要材質　　：ステンレス鋼

⑪計測制御系

・計測機器　　：キャプセル制御装置のプロセス計装機器　（1式）
液位計、流量計、圧力計、差圧計(伝送器,オリフィスを含む)
温度計、水質計、漏水検知器等

・計測制御盤　　：炉室地下１階のキュービクル外に設置し、キュービクル外から運転に必要な現場操作と制御及びプロセス値の指示、警報・安全動作の発報を行う。

・特記事項　　：安全保護回路への安全動作信号（「給水側ライン圧力高」及び「給水側ライン圧力低」）（2out of 3方式）

⑫サンプリング装置

サンプリング装置は、キャプセル制御装置系統内の水をサンプリングするための装置である。サンプリングボックスは、内部を負圧に維持できる構造であり、キュービクル外の中２階に設置した。

⑬FP ガス処理装置

FP ガス処理装置は、燃料試料破損時及び破損処置作業において、キャプセル制御装置系統内から放出された FP ガスを除去するためのもので、必要に応じてキャプセル制御装置に接続して、排気系へ放出される FP ガスを除去する。

・数量　　：1式

・方式　　：コールドチャコールトラップ方式

⑭関連機器

・集中監視制御装置

キャプセル制御装置、シュラウド照射装置（OSF-1)、ヘリウム-3 出力可変装置のプロセスデータの監視及び保存、運転操作を行うための集中監視制御装置を設けた。

集中監視制御装置は、炉室 1 階の照射制御室に設けた。

・構成　　：集中監視用計算機（１式）
　　：データ収集用計算機（１式）

・各装置のプロセスデータ、沸騰水キャプセルの温度データ、SPND 指示値、燃料中心温度、FP ガス圧力及び燃料試料伸び計測データ、校正試験用ヒータキャプセルのヒータピン出力、熱電対、SPND 出力データ（出力校正、γ発熱量測定等）を収集、表示、保存する機能を有する。

・各装置の運転に係る監視、主な運転操作が可能。

・メンテナンス時に現場と連絡ができる通信装置を設けた。

(2) ヘリウム-3 出力可変装置（以下の機器名は Fig 2.1-4 参照）

①ガス循環器

・型式　　：ベローズポンプ式

・数量　　：2 台（予備１台）

・流量　　：60cm$^3$/min 以上

・最高吐出圧力　　：4.4 MPa(内圧)
　　：0.1 MPa(外圧)
・流体温度　　：50℃
・流体種類　　：He-3ガス

②トリチウムトラップ

・型式　　：水素吸着方式
・最高吐出圧力　　：4.4 MPa(内圧)（トリチウム吸着時）
　　：0.1 MPa(外圧)（トリチウム分取時）
・最高使用温度　　：50℃（トリチウム吸着時）
　　：450℃（トリチウム分取時）
・容量　　：約 110cm$^3$
・ゲッター材充填容量　　：Zr-Co合金：144g
　　：Cu球：231g
・流体種類　　：He-3ガス
・数量　　：2台

ヘリウム-3 出力可変装置では、劣化が著しいガス循環器の更新及びトリチウムトラップの新設・更新するための設工認申請を行い実施した。特にトリチウムトラップについては、旧装置では、使用温度 400℃でチタンスポンジをトリチウムゲッター材として使用し、１基あたり 222TBq のトリチウム吸着を限界と定め、その都度新品のトリチウムトラップを新規製作し、吸着限界量に達するたびに更新してきた。今回使用したトリチウムトラップは、トリチウムゲッター材としてジルコニウムコバルト(Zr-Co)を利用し、トリチウムを常温で吸着でき、450℃焼鈍化することでトリチウムを分取でき、再利用を可能にしたものである。

(3) OSF-1 冷却系及びキャプセル交換機

①配管、弁類

・数量　　：1 式
・主要材質　　：ステンレス鋼

OSF-1 冷却系及びキャプセル交換機については基本的な機能はこれまでの装置と同様として、OSF-1 冷却系集中操作盤についてのみ、全面更新の設工認申請を経て使用前検査、施設検査を受検し更新した。キャプセル交換機については、不具合箇所を中心に機器の整備及び保守点検を実施した。

この出力急昇試験設備は、JMTR の設置許可上のループ照射設備であり、保安規定上も定期点検の実施等を行うよう定められており、本装置の製作にあたっては保安規定上の「修理及び改造計画」を作成した上で実施した。保安規定による「修理及び改造計画」を Table 1、Table 2 に示す。

本装置の現場据付状況の進捗状況を定点から撮影してまとめた写真を Photo 1 に示す。

## 2.2 材料照射試験装置

材料照射試験装置（以下、「照射環境制御装置」という）は炉心構成材の照射環境における応力腐食割れ研究を行うために製作設置したもので、現在注目されている照射誘起応力腐食割れ(IASCC：Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking)の解明に資するものである。

照射環境制御装置は、炉内に装荷されたキャプセル内にBWRまたはPWRの水質を模擬した高温高圧水を供給するとともに、キャプセルから排水された水を精製して循環する装置であり、循環系統、水質調整系統、計測制御系統、及び補給水系統等から構成される。また幅広い照射条件に対応するため、BWR用とPWR（水化学）用の2種類の照射環境制御装置を製作し、BWR用は平成23年5月に現地据付けが完了した。PWR（水化学）用は現在製作中で平成24年度に現地据付け工事を行う予定である。

今回整備したBWR用照射環境制御装置は、2基設置を完了し、1基で4本までのキャプセルを同時に接続することが可能なBWR炉内環境を模擬できる装置であり、溶存酸素濃度及び溶存水素濃度の調節等が行えるものである。これらの装置は炉内のキャプセル内を水が循環するため、循環水の放射線分解による$^{16}$N（放射性核種）の発生や、キャプセル等の材料から溶出するクラッド等により循環系統の放射能が高くなる。そのため本装置はキュービクルに設置した。

本装置の現場据付状況の進捗状況を定位置から撮影してまとめた写真をPhoto 2に示す。概略図・系統図及び機器配置図をFig.2.2-1～Fig.2.2-5に示す。

### 2.2.1　BWR用照射環境制御装置の系統仕様

本装置は、キャプセル試験片の照射温度範囲が厳しく、軸方向に配置された試験片すべてが照射目標温度(282℃～302℃)を要求されているため、キャプセル自体にも工夫を凝らし飽和温度キャプセルを使用して行うものである。装置に異常が発生し減圧現象や、加熱ヒータの異常が起きた場合は、キャプセル内外で沸騰を生じる危険性があるため、可能な限り装置を停止せず減圧防止や温度維持ができるように設計されている。

(1) 使用条件

- 供給水　：軽水
- 最高使用温度　：325℃
- 最高使用圧力　：10MPa
- 供給水流量　：1500kg/h（キャプセル１本あたり最大：400kg/h）
- 設置数　：2基
- 接続可能なキャプセルの数　：4本/基

(2) 水質条件

- 溶存酸素濃度　：0～200ppb
- 溶存水素濃度　：0～1ppm
- pH　：5.6～8.6
- 導電率　：≦100μS/m

2.2.2　主な機器の機能と設計上の留意点

JMTR には平成 14 年から平成 18 年の第 165 サイクル終了まで IASCC 研究のため BWR 条件でキャプセルに高温高圧水を供給、循環、精製を行う装置(以下、「水環境制御装置」という)が運転されていたが、今回、旧装置を撤去した後に、新たに設計・製作した BWR 用照射環境制御装置の据え付けを行った。新たな設計・製作にあたっては、旧装置での経験を反映し、機器の選択をはじめ、より制御しやすい機能の付加、あるいは加熱器ヒータ断線のようなトラブルが発生しても速やかに対応が可能な機能を有した機器を設置した。以下に BWR 装置 1 基当りの主な機器の機能と設計上留意した点を中心に記述する。

(1) 循環系統

①主ポンプ

・型式　　：往復動型ダイヤフラムポンプ
・数量　　：2 台
・流量　　：約 1500kg/h/1 台
・最高吐出圧力　　：10 MPa
・主要材質　　：ステンレス鋼

BWR 用照射環境制御装置には 2 台の主ポンプを並列に設置し、定常運転時には 2 台とも定格流量の 50%以下で運転することにより、万一、1 台のポンプに故障などが発生した場合においても残り 1 台のポンプで必要流量を確保できるようにした。また主ポンプは往復動型のため、ポンプ出口の脈動が著しいため、解析モデル検討を行い脈動防止の対応を図った。具体的には、それぞれの主ポンプ出口にブラダ型アキュムレータ(ブラダ内は窒素ガスを封入)を設置するとともに主ポンプ出口の主配管に気液 2 相のサージタンクを連結させ対応を図った。ポンプ電源 1 台は商用、残り 1 台はディーゼル電源から取り込むことによってバックアップ機能を持たせた。

②サージタンク

・型式　　：たて置円筒型
・数量　　：1 台
・容量　　：0.12$m^3$
・主要材質　　：ステンレス鋼

サージタンクは、主ポンプの脈動及び水質分析に必要な系統水のサンプリングによる系内の圧力変動を吸収・緩和するためのもので、ヘリウムガスの給排気による圧力調整機能を有した「たて置円筒型タンク」である。

③予熱管

・型式　　：二重管式
・数量　　：1 台
・交換熱量　　：約 263W
・流体温度　　：給水側入口：約　50℃／出口：約 180℃
　　：排水側入口：約 280℃／出口：約 180℃
・主要材質　　：ステンレス鋼

予熱管は、キャプセルに供給する水とキャプセルからの排水の熱交換を効率よく行うためのもので、二重円筒管である。

④加熱器

・型式　　：たて置円筒型・電気ヒータ式
・数量　　：4 台
・ヒータ容量　　：約 45kW／加熱器 1 基当り
・流体温度　　：入口：約 180℃／出口：約 260℃
・主要材質　　：ステンレス鋼

加熱器は、キャプセル内に装荷された試験片の温度を所定の温度範囲に制御することが可能な電気ヒータ式であり、電気ヒータは加熱器容器の外部に設けられたウェルに装着され 1 基あたり 19 本（予備 1 本）のヒータパイプを有した構造を成し、ヒータパイプと水は直接接触しない構造である。なお水環境制御装置で使用した加熱器が度重なる不具合を起こしたことから、今回それらの経験を踏まえて改良型の加熱器を設計、製作して設置した。本加熱器の詳細については別項で述べる。

⑤冷却管

・型式　　：二重管式
・数量　　：1 台
・交換熱量　　：約 240kW
・流体温度　　：給水側入口：約 180℃／出口：約 50℃
　　：UCL 側入口（1 パス入口）：約 34℃／出口：約 53℃
　　（2 パス入口）：約 34℃／出口：約 40℃
・主要材質　　：ステンレス鋼

冷却管は、キャプセルからの排水をイオン交換樹脂の性能に支障のない温度まで冷却するために予熱管の下流側に設置した二重円筒管である。

⑥圧力調節弁

・型式　　：ダイヤフラム式空気作動弁
・数量　　：2 台
・主要材質　　：ステンレス鋼

圧力調節弁は、照射試験中にキャプセル内の圧力保持を行うためのもので、圧力調節を遠隔操作で行うダイヤフラム式空気作動弁である。故障などの異常時には切り替えができるよう 2 台並列に設置し、また弁駆動用圧空の喪失時には弁開度を保持することが可能な機構を有する。更に異常時においてもキャプセルの流量が確保できるように機械式の全閉防止機構を有する。

(2) 水質調整系統

①クラッド除去フィルタ

・型式　　：たて置円筒型・中空糸膜フィルタ
・数量　　：1 台
・ろ過性能　　：0.4μm（90%カット）
・主要材質　　：ステンレス鋼

・遮へい材　　：鉛

クラッド除去フィルタは、キャプセルからの排水に含まれる固形状の腐食生成物（クラッド）を除去するためのもので、イオン交換塔の上流側に設置した。フィルタの型式は、ろ過性能及び逆洗性に優れ、２次廃棄物の発生が少ない中空糸膜フィルタとし、フィルタの交換が容易に行える構造とした。また、クラッド除去フィルタには、γ線を遮へいするための遮へい体を設けた。

②イオン交換塔

・型式　　：たて置円筒型・混床式
・数量　　：2 台
・イオン交換樹脂量　　：約 80L（イオン交換塔１台当たり）
・主要材質　　：ステンレス鋼
・遮へい材　　：鉛

イオン交換塔は、キャプセルからの排水に含まれるイオン状の不純物を除去するためのもので、水を下降流で通水することで高純度に精製することが可能な混床式２基を設置し、水質の状況により１基ずつ切り替えて又は２基を同時に使用できる。なお、イオン交換樹脂の再生は行わず、使用済イオン交換樹脂の流体移送が可能な構造とした。

③水質調整タンク

・型式　　：たて置円筒型
・数量　　：1 台
・容量　　：約 2m$^3$
・主要材質　　：ステンレス鋼

水質調整タンクは、キャプセルへの供給水の水質を調整するためのもので、気液二相構造とし、液相部には溶存酸素濃度及び溶存水素濃度の調整を行うための水質調整用ガス（ヘリウム、酸素及び水素）の気泡を発生させるバブリングノズルを設けた。

(3) 補給水系統

・型式　　：たて置円筒型
・数量　　：1 台
・容量　　：約 1.5m$^3$
・主要材質　　：ステンレス鋼

補給水系統は、JMTR の純水補給系統から供給された脱気純水を貯蔵、脱気、精製し、照射環境制御装置へ所要の純水を供給する系統であり、補給水タンク、イオン交換塔、UV ランプなどから構成する。なお、補給水系統は、2 基の BWR 用照射環境制御装置及び水化学用照射環境制御装置の共通設備とした。

(4) 計測制御系統

計測制御系統は、BWR 用照射環境制御装置の運転に必要となる温度、圧力、流量、放射線量などのプロセス量を計測及び制御するとともに、照射試験データである試験片温度、水質などの計測データを収集する設備であり、制御盤、水質測定計器、放射線モニタ、その他の各種計測器などから構成する。また、別途設置した試験片ユニットの荷重発生機構であるベローズ内

の圧力とキャプセル内の高温高圧水の圧力差を利用して、試験片へ負荷を制御するための荷重制御装置の運転及び試験に関するデータを取り込み、BWR 用照射環境制御装置と荷重制御装置が連動した運転が行える。

①制御盤

制御盤は、BWR 用照射環境制御装置の運転状態の監視、機器等の運転操作を行うとともに、必要な警報表示、保護動作等を行うためのもので、JMTR 炉室 1 階の照射制御室に設置した。また、パソコン等の専用端末を利用した監視、操作、データ収集等が行える。

②水質測定計器

水質測定計器は、BWR 用照射環境制御装置の系内における溶存酸素濃度、溶存水素濃度、電気伝導率及び pH をインライン計測するためのもので、水質調整タンク、キャプセル入口及びキャプセル出口等に設置した。

③放射線モニタ

放射線モニタは、BWR 用照射環境制御装置の設置場所の JMTR 炉室地下 1 階キュービクル内におけるγ線の線量率を連続的に監視するためのものである。

④その他

BWR 用照射環境制御装置の運転、保守に必要となる温度、圧力、流量、水位等の計測器及び漏水検知器等を設置した。

### 2.2.3 改良型加熱器の特徴

(1) 加熱器ヒータ断線対策

①単相 SCR 制御方法の採用について

加熱器（1 基当り）は、必要とするヒータ容量（約 60kW）に対して、2.5 kW（印加電圧：200V）ヒータ 19 本（1 本は予備）を設け、合計のヒータ容量 45kW の性能を有する設計としている。ヒータ自体は、3 相及び単相のどちらの SCR 制御にも対応が可能である。

単相 200V の SCR 制御を採用した場合には、18 台の単相 SCR が必要となる。また、ヒータが 1 本断線した時には、ヒータ容量が 17／18 となる。3 相 400V の SCR 制御で、〔2 本直列×3 組並列〕×3 相のデルタ結線（Table 3 参照）を採用した場合には、1 台の３相 SCR で制御することが可能である。この場合、ヒータが１本断線した時には、ヒータ容量が 16／18 となる。新たに設計した BWR 用及び水化学用の加熱器の構造を Fig. 2. 2-6 及び Fig. 2. 2-7 に示す。

以上のことより、3 相及び単相のどちらの SCR 制御を採用した場合でも、ヒータ１本断線に対しては、ヒータ容量の余裕で吸収することが可能である。

②復旧作業を考慮した結線、構造について

加熱器は、ヒータを下方から引き抜き、交換可能な構造とした。また、ヒータは同心円状に 2 列で配列し、加熱器下方のケーブル結線位置及びヒータ取付ナット位置について、内側ヒータと外側ヒータの高さ及び隣接部の高さを変えることで作業性を向上させる構造とした。ヒータの全長は約 1500mm となるため、加熱器をキュービクルの 2 階部分に設置するとともに、加熱器の下方にはヒータ交換に必要なスペースを考慮した配置とした。

③ヒータ交換の可能な加熱器構造について

上記②に示すとおり、ヒータが断線した場合においてもヒータ取付ナットを緩めることで加熱器の底部から断線ヒータを引き抜き、新規ヒータとの交換が可能な構造とした。

## 3. 水力ラビット照射装置

既存の水力ラビット照射装置は、材料照射やRI製造に利用されてきた。また、再稼働後におけるJMTRの有効利用の一環として、がんの診断薬に用いる医療用ラジオアイソトープ $^{99m}$Tcの親核種である $^{99}$Mo の製造を行うことを想定し既存の水力ラビット照射装置の一部更新及び新規増設（平成24年度予定）のため製作を行っているところである。なお、既設水力ラビット照射装置については、予防保全を考慮し、①循環ポンプの分解点検、②挿入装置・取出し装置及び通過検出器の分解点検、③流路切換用三方弁、安全弁の分解点検を行った。水力ラビット照射装置フローシートをFig.3-1に示す。

## 4. 照射キャプセル温度制御装置

JMTRでは、照射キャプセル内の温度や圧力などの照射環境を試験目的に応じて照射試験を実施するために様々な装置を有している。照射キャプセル温度制御装置は、炉心に装荷したヘリウム雰囲気中で照射試料を試験する照射試験用キャプセルを接続してキャプセルの試料温度を制御する装置で、温度制御精度の向上と照射試験の効率化を目的として平成12年度に設置された。照射キャプセル温度制御装置は、1台で照射キャプセル2本の温度制御が可能な併用型温度制御装置と、専用のネットワークで結ばれた併用型温度制御装置の運転操作並びに運転状態監視を総合的に管理するキャプセル総合制御システム（サーバー、オペレータステーション）構成されている。併用型温度制御装置は、JMTR炉室1階の炉プール周りに配置して、ネットワーク対応型のプロセスコントローラを使用し、照射キャプセルの温度制御や安全動作等を行う装置である。

この併用型温度制御装置に使用しているプロセスコントローラが平成15年に製造中止となり、平成16年にはキャプセル総合制御システムに使用しているパソコンのOSがサービス停止となった。このため、これら故障時の修理、代替品調達を考慮し、併用型温度制御装置2台のプロセスコントローラとローカル操作パネル*1、キャプセル総合制御システムのサーバー、オペレータステーション及びプリンター各1台と制御ネットワーク、キャプセル照射装置の運転に必要な共通設備のデータ収集装置*2を平成21年度に更新し、平成22年度に残り7台を予防保全から更新した。照射キャプセル温度制御装置の全体構成をFig.4に示す。

*1：ローカル操作パネルは、キャプセルの運転状態、バルブの開閉操作及びガス置換等を現場で行うためのものである。

*2：共通設備のデータ収集プロセスコントローラは、照射キャプセルの運転状態監視に必要な原子炉及びキャプセル共通設備のデータ収集・監視するもで、ネットワークを介して併用型温度制御装置及びキャプセル総合制御システム*3（サーバー*4、オペレータステーション*5）に取込まれる。

*3：キャプセル総合制御システムは、サーバー、オペレータステーション及びプリンター*6から構成される。

*4：サーバーは、トレンドグラフ等のデータを収集し、それらのデータをオペレータステーション提供する。

*5：オペレータステーションは、併用型温度制御装置のプロセスコントローラへ操作指示及び運転状態等を監視する。

*6：プリンターはオペレータステーションの画面のハードコピー及びデータの帳票印刷をするものである。

## 5. まとめ

JMTR では平成 19 年から 4 年かけて原子炉施設の改修を行い、この間新たな照射設備である燃料・材料の照射試験装置の設計から据付けを行っている。
燃料照射試験装置では、高燃焼度燃料の安全評価、破損影響評価が行えるよう出力急昇試験装置の整備を行い、材料照射試験装置では、軽水炉の炉内構造物に関して、照射環境下における応力腐食割れ評価に必要な中性子照射試験を実施するための整備を行った。これらの装置の製作にあたっては、「核燃料物質の使用変更許可」、「設工認申請」、「施設検査」、「使用前検査」を伴う装置であることから設計段階から、準備を行い各段階で「使用前検査」「施設検査」を受検し据付けを行った。現在は、運転のためのマニュアル作成、運転訓練等を行っているところである。

照射設備の製作にあたっては、既設装置で起きた不具合や取扱に苦労した点を十分に反映させた機能にするため適切な機器の選択、改良型加熱器の設計・製作行い、ソフトの変更などと合わせ、より使いやすい照射装置の設置を目指した。

JMTR は平成 23 年に発生した東日本大地震よる点検、補修などのため当初の稼働予定が遅れているが、アジアの中核を担う照射研究炉 JMTR として、まさに最先端の研究に対応できる照射装置の利用が待たれるところである。

謝　辞

本報告書をまとめるにあたり、材料試験炉部小森芳廣部長に有意義なご指導及びご助言を頂きました。また、本報告書をまとめる上で貴重なご意見を頂きました近江正男照射課長に深く感謝致します。

【参考文献】

1) 飯村光一、他　：JAEA-Technology 2009-021「燃料異常過渡試験に係る線量評価」
2) 小沼勇一、他　：JAEA-Technology 2009-034 「軽水炉照射環境下における SCC 研究のための照射環境制御装置の設計検討」
3) 小川光弘、他　：JAEA-Technology 2010-019「燃料高負荷環境照射試験装置の設計検討」

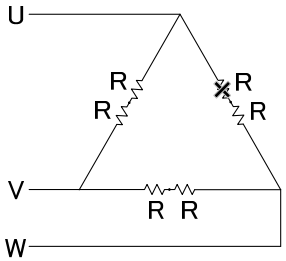
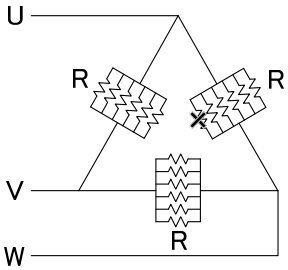
Table 1　大洗研究開発センター（北地区）原子炉施設保安規定第 5 編第 38 条
に係る修理及び改造（照射設備）

| 設備の名称 | 期間 | 修理及び改造理由 | 修理及び改造方法 |
|---|---|---|---|
| ヘリウム－３出力制御型沸騰水キャプセル照射設備のうち沸騰水キャプセル本体 | 2009 年 4 月 22 日～2011 年 6 月 30 日 | 照射試料の変更に伴う対応 | 製作 |
| OSF-1 照射装置のうち集中操作盤 | 2009 年 8 月 17 日～2011 年 5 月 31 日 | 予防保全 | 更新 |
| ヘリウム－３出力制御型沸騰水キャプセル照射装置のうちキャプセル制御装置、ヘリウム－３出力可変装置の一部 | 2010 年 2 月 1 日～2011 年 5 月 31 日 | 照射試験への対応及び予防保全 | 更新 |

Table 2　大洗研究開発センター（北地区）核燃料物質使用施設等保安規定第 5 編第 18 条
に係る修理及び改造（照射設備）

| 設備の名称 | 期間 | 修理及び改造理由 | 修理及び改造方法 |
|---|---|---|---|
| BOCA 照射装置のうち沸騰水キャプセル本体 | 2010 年 7 月 30 日～2011 年 6 月 30 日 | 照射試料の変更に伴う対応 | 製作 |
| OSF-1 照射装置のうち集中操作盤 | 2010 年 7 月 30 日～2011 年 5 月 31 日 | 予防保全 | 更新 |
| キャプセル制御装置、計測制御系及び警報装置 | 2010 年 7 月 30 日～2011 年 5 月 31 日 | 照射試験への対応 | 更新 |

Table 3　改良型加熱器の特徴（旧加熱器との比較）

| 項目 | 旧加熱器 | 改良型加熱器 |
|---|---|---|
| 加熱器構造<br>（ヒータを個別に交換できる構造への改良） | 直浸型ヒータ<br>ヒータエレメントが、加熱器の容器に溶接で取り付けられ、耐圧部を構成しているため、ヒータエレメントの交換ができない構造 | ウェル型ヒータ<br>ヒータエレメントは、加熱器容器の保護管（ウェル）内に取りつけられるため、ヒータエレメントの引き抜き、交換が可能な構造 |
| ヒータ仕様、数量<br>(加熱器容量の増加、ヒータ単体出力の改善) | 二クロム帯式、高電力密度ヒータ<br>発熱体にコイル状の二クロム帯を使用した高電力密度ヒータ（電力密度；7.8W/cm$^2$、ヒータ容量：6kW/本、定格電圧：AC220V）を採用し、ヒータ本数は 6 本 | 二クロム線式、低電力密度ヒータ<br>発熱体に実績のある二クロム線を使用した一般的な低電力密度ヒータ（電力密度；3.0W/cm$^2$、ヒータ容量：2.5kW/本、定格電圧：AC440V）を採用し、ヒータの数量は 18 本 |
| ヒータ結線<br>（ヒータ断線時の影響） | 2 本シリーズ・デルタ結線<br>ヒータ断線した場合、断線したヒータが接続されている相間（下図の場合、U-V 間）の 2 本のヒータが使用できなくなり、V 結線となるため、加熱器全体のヒータ容量が 4/6（約 67%）まで低下する（実際には、設置していたサイリスタの仕様により、V 結線となった場合の加熱器全体のヒータ容量は 50%に制限されていた<br>  | 6 本パラレル・デルタ結線<br>ヒータが断線した場合、加熱器全体のヒータ容量が 17/18（約 94%）まで低下するが、加熱器の必要なヒータ容量（37kW：ヒータ 15 本分相当）に対して余裕を持っており、最大 3 本分のヒータ断線の影響を吸収することが可能<br>  |
| ヒータ端子部の構造<br>（電源ケーブル接続の方法） | 端子と丸圧着端子を平座金、ナットで固定<br>端子部の緩みが生じやすく、接触面積が減少することによって、焼損が発生する可能性のある構造だった | 端子と圧着スリーブを溶接で固定<br>端子部の緩みが生じにくく、焼損が発生しにくい構造 |

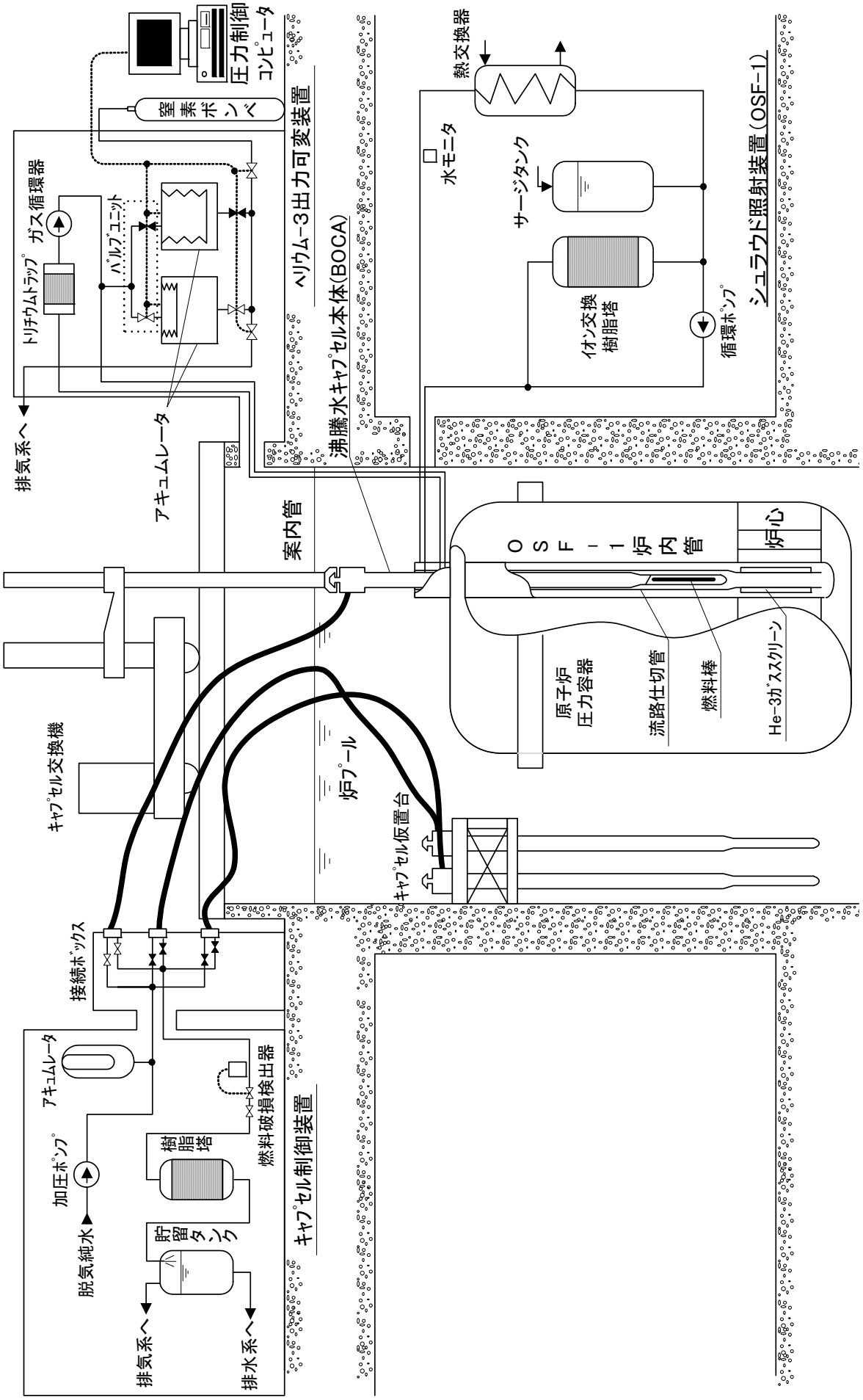



Fig.2.1-1　出力急昇試験設備（更新前）

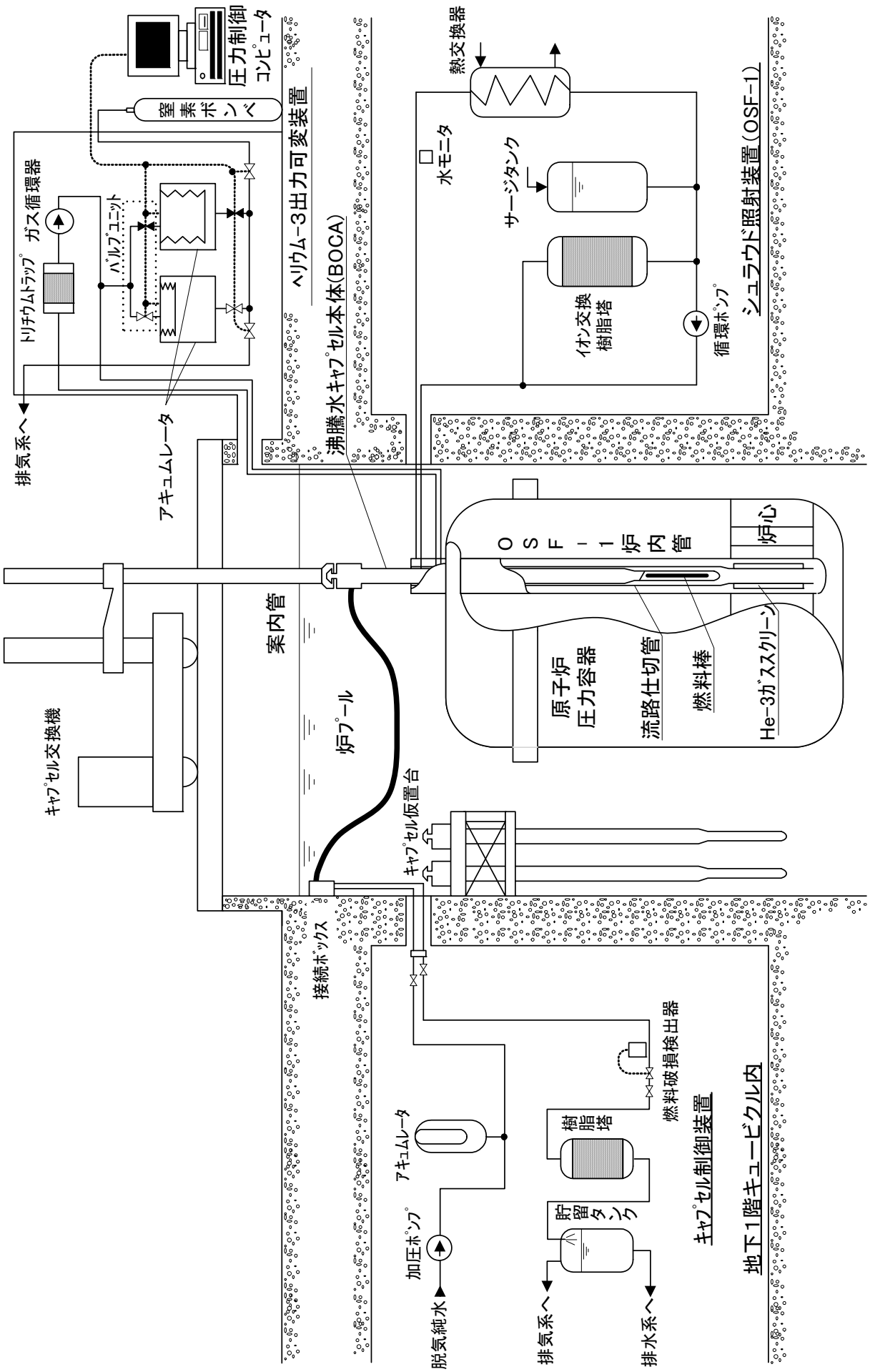



Fig.2.1-2 出力急昇試験設備（（更新後）

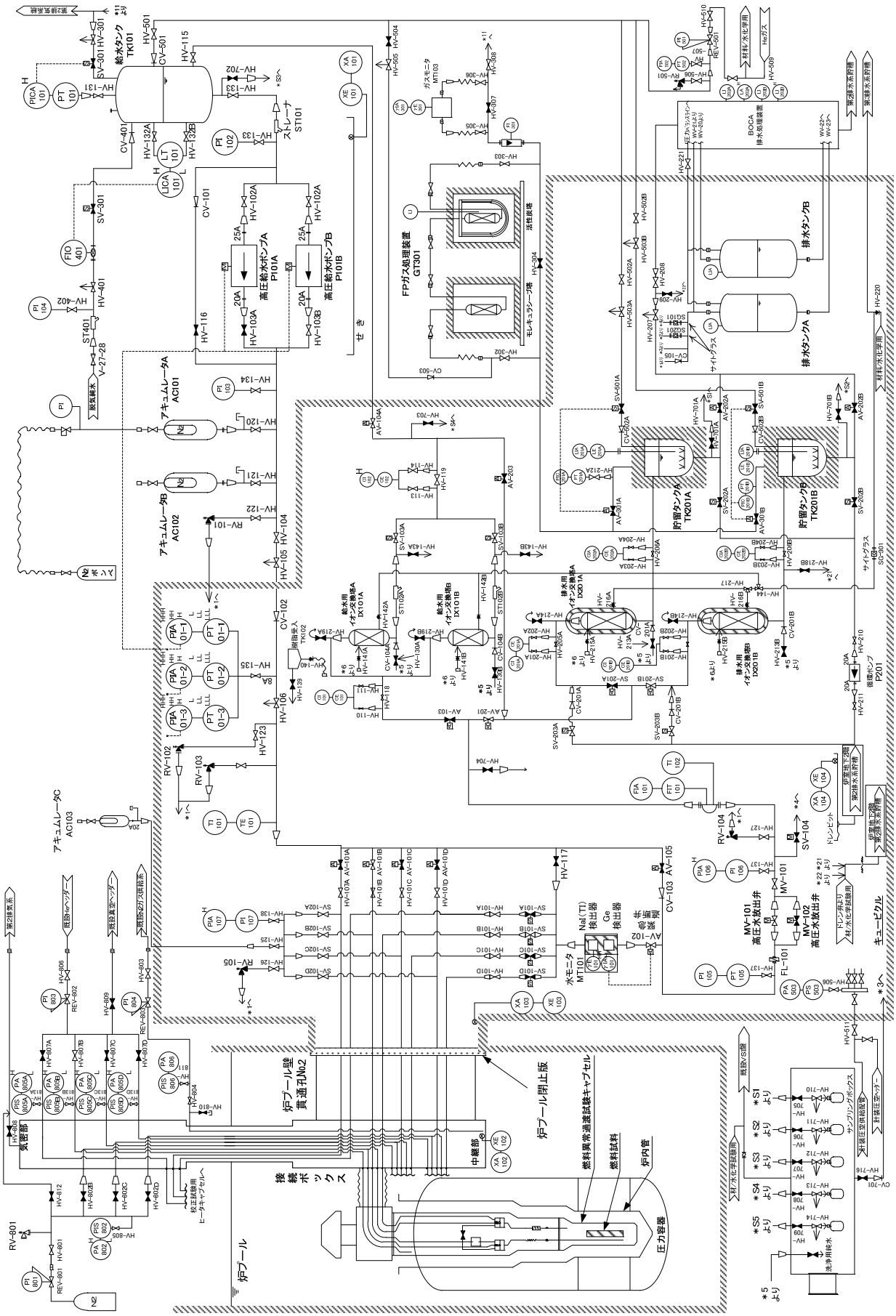



Fig.2.1-3 キャプセル制御装置フロー図

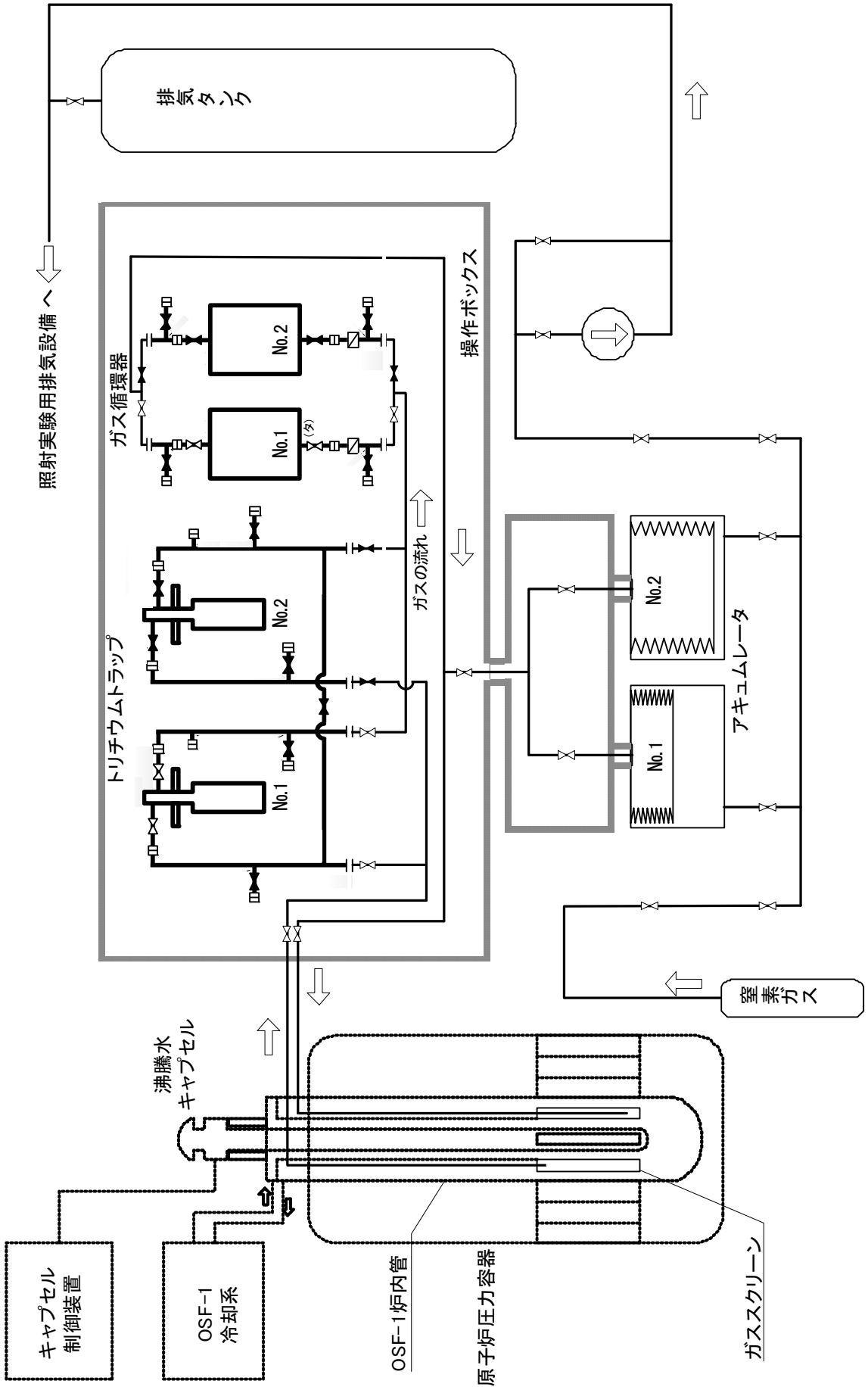



Fig.2.1-4 ヘリウム-3 出力可変装置フロー図

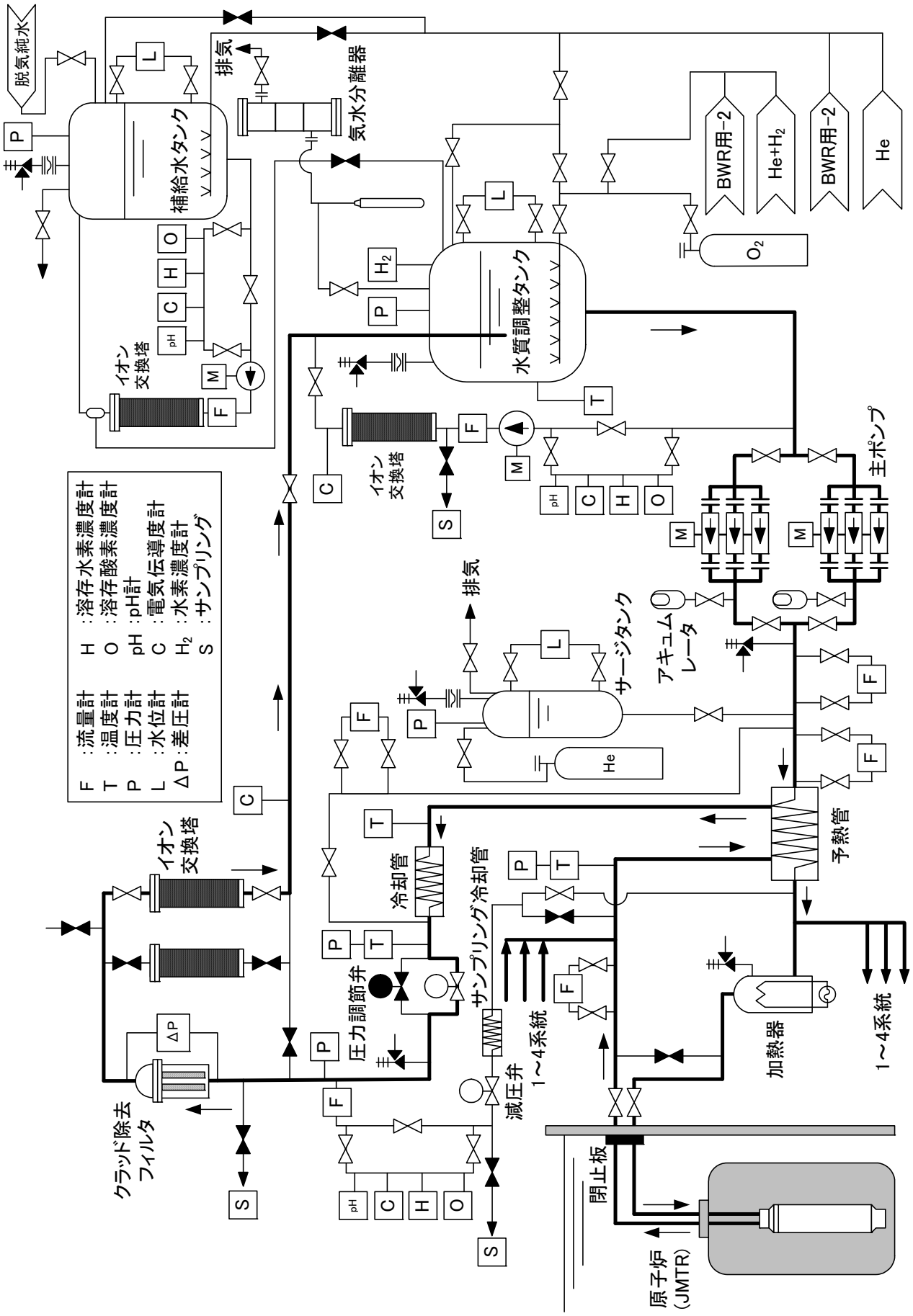



Fig.2.2-1 照射環境制御装置概略図

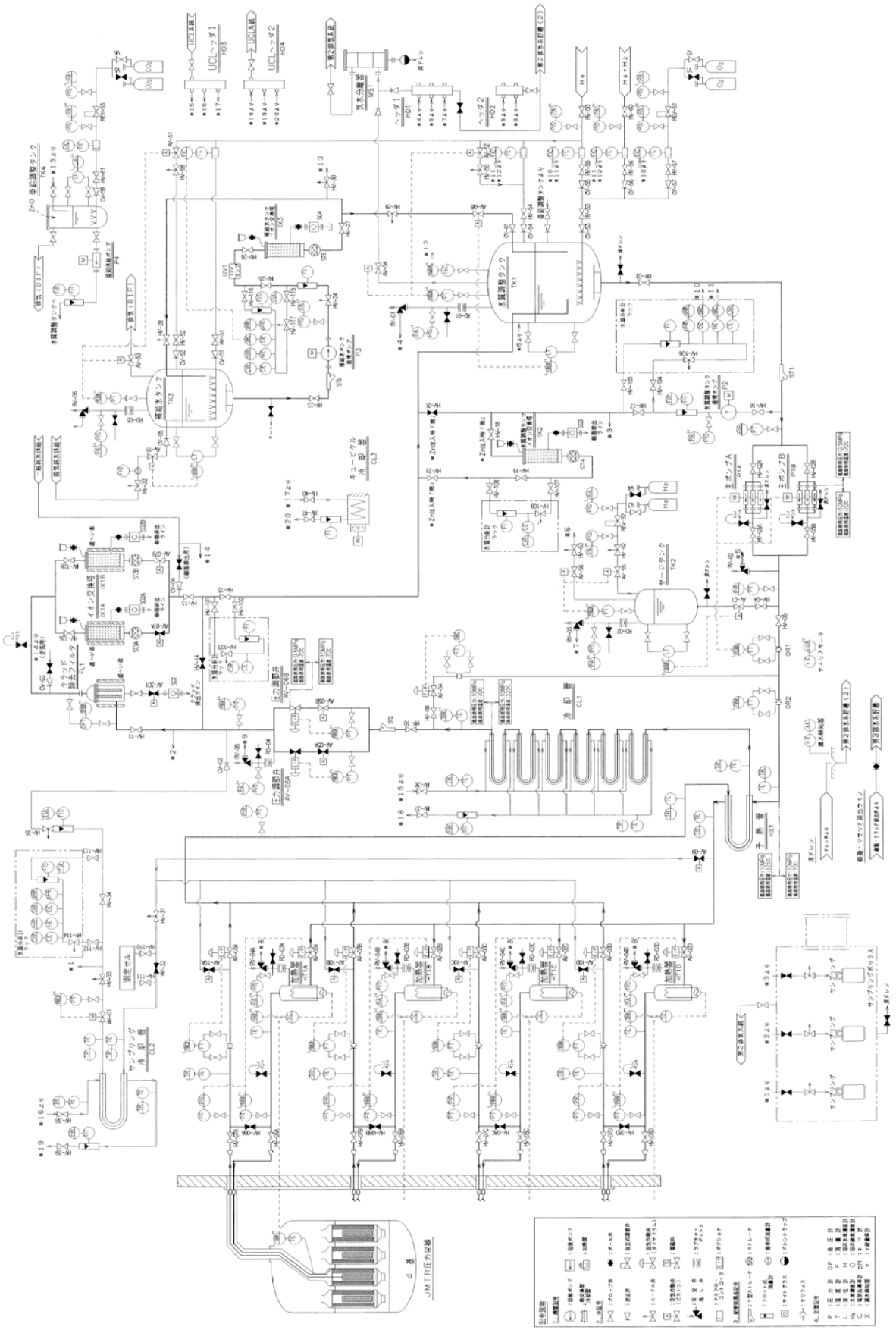


Fig.2.2-2 BWR 用照射環境制御装置系統図

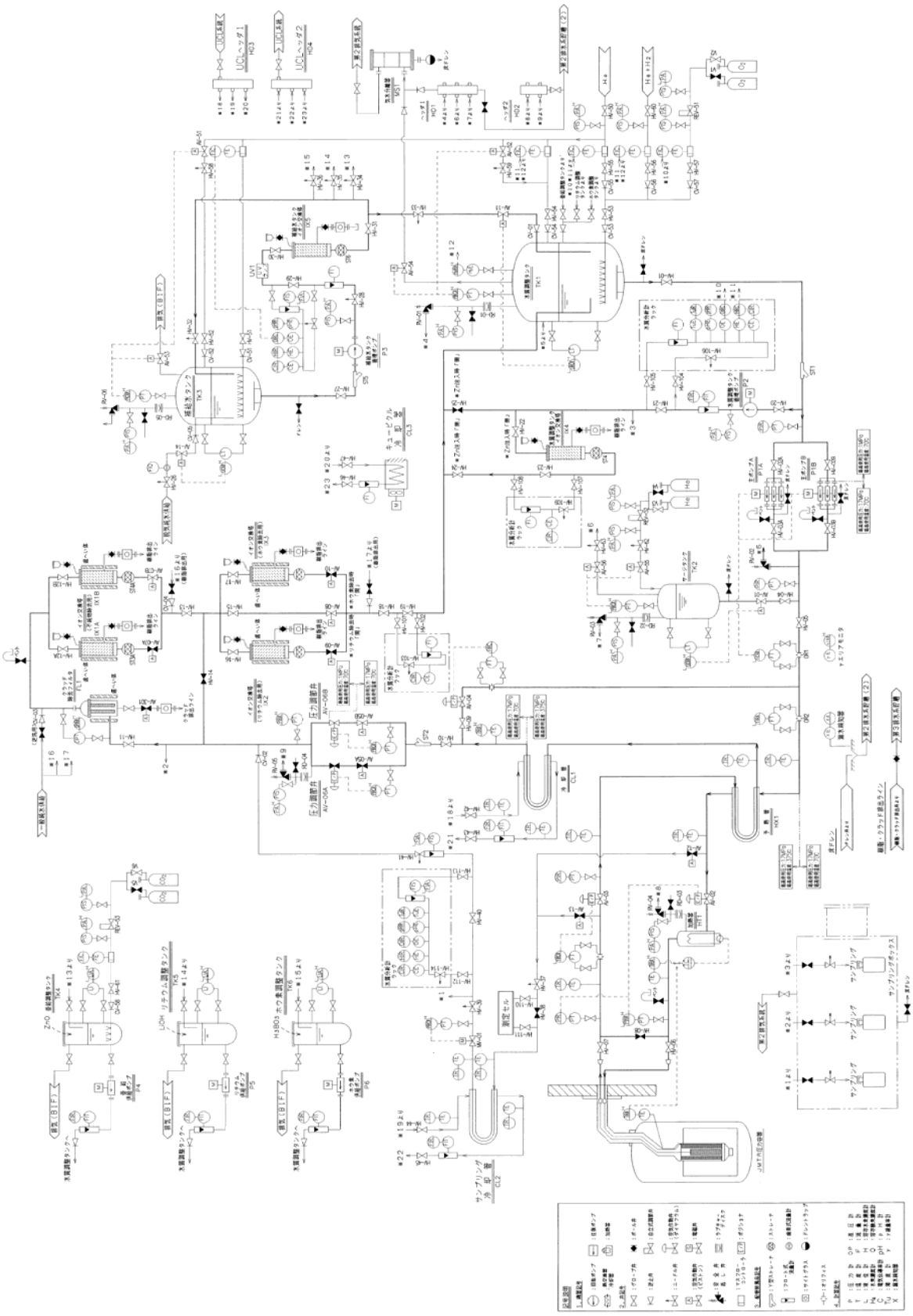


Fig.2.2-3 水化学用照射環境制御装置系統図

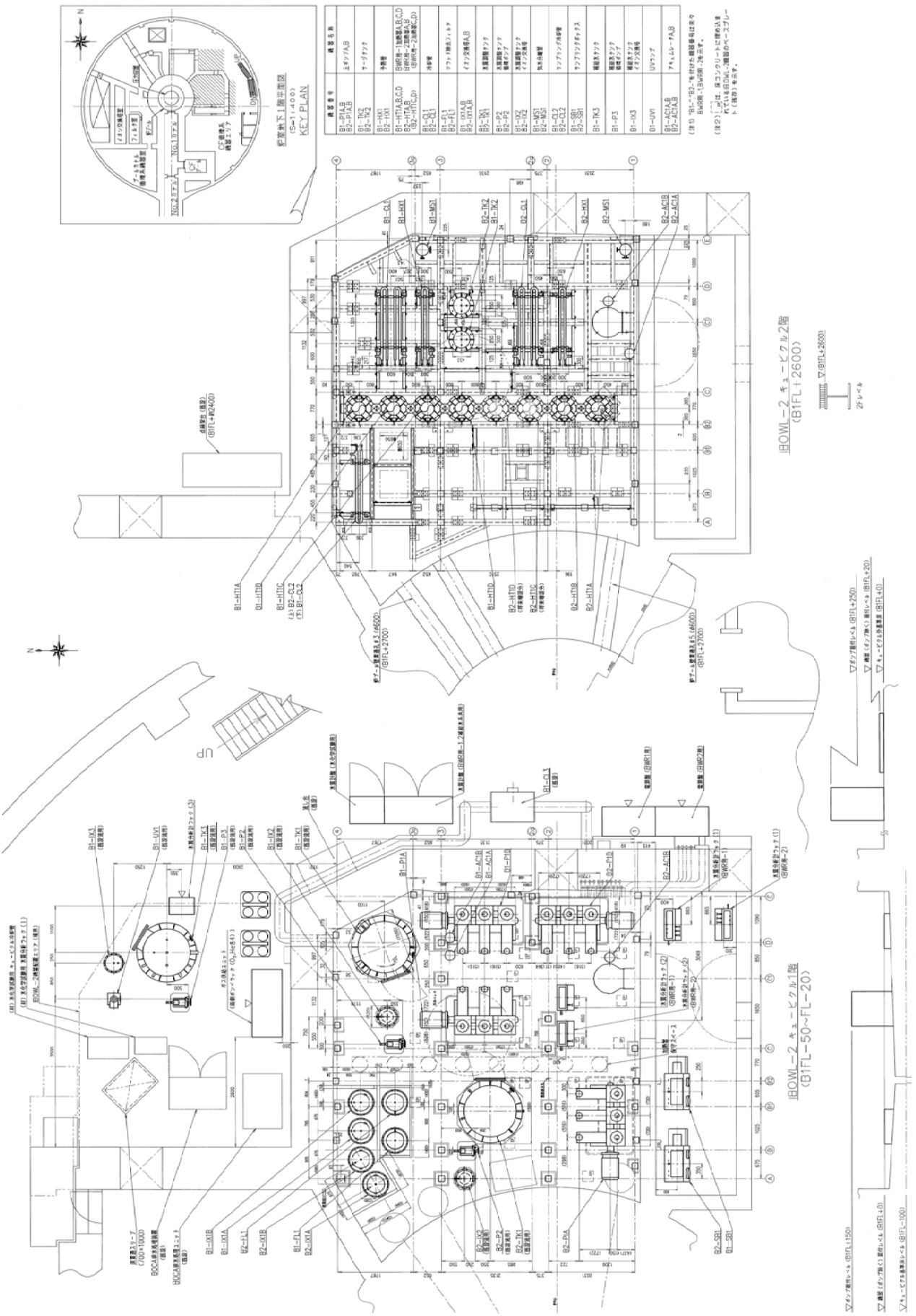



Fig 2.2−4 BWR 用照射環境制御装置の機器配置図

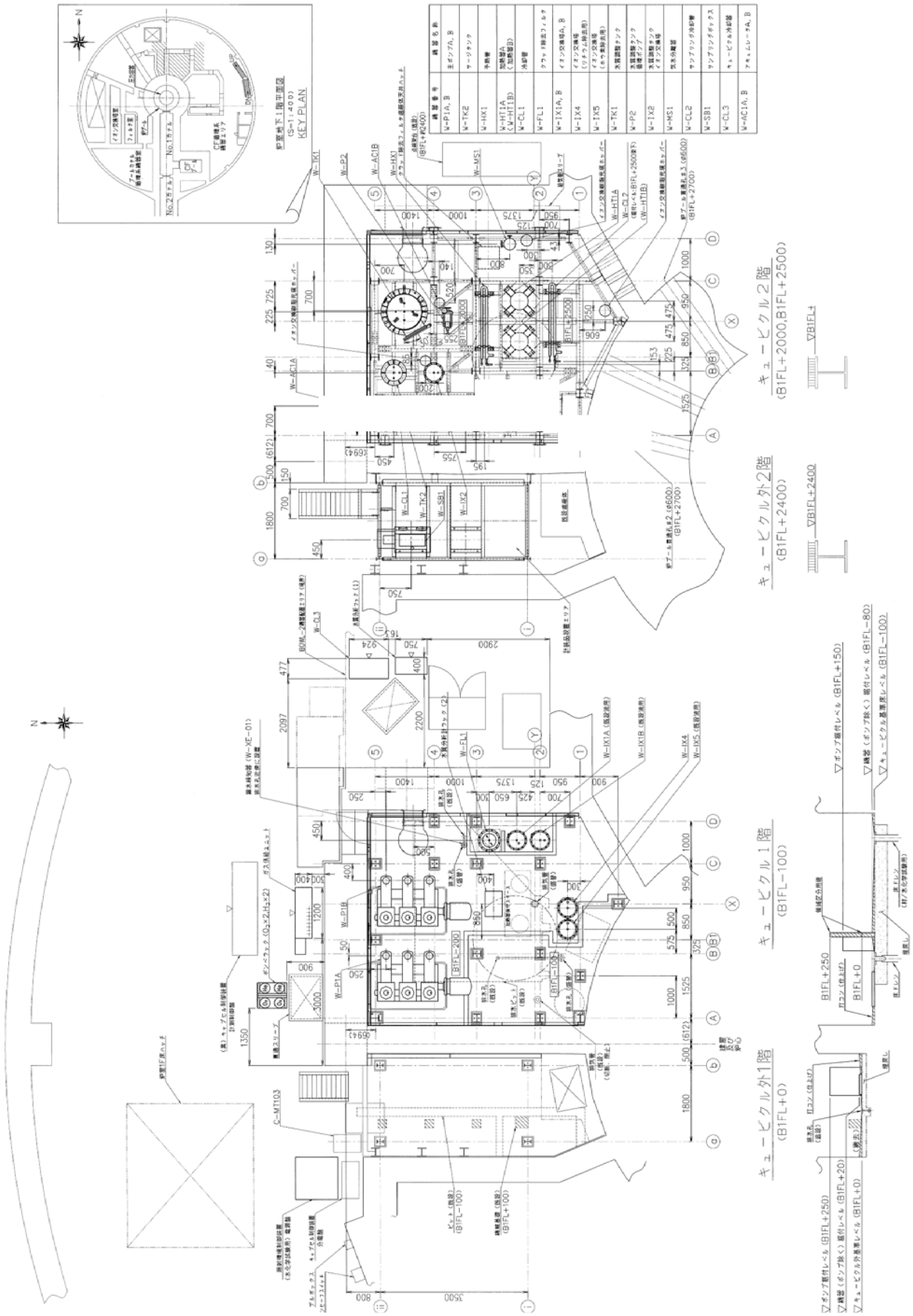



Fig2.2-5 水化学用照射環境制御装置機器配置図

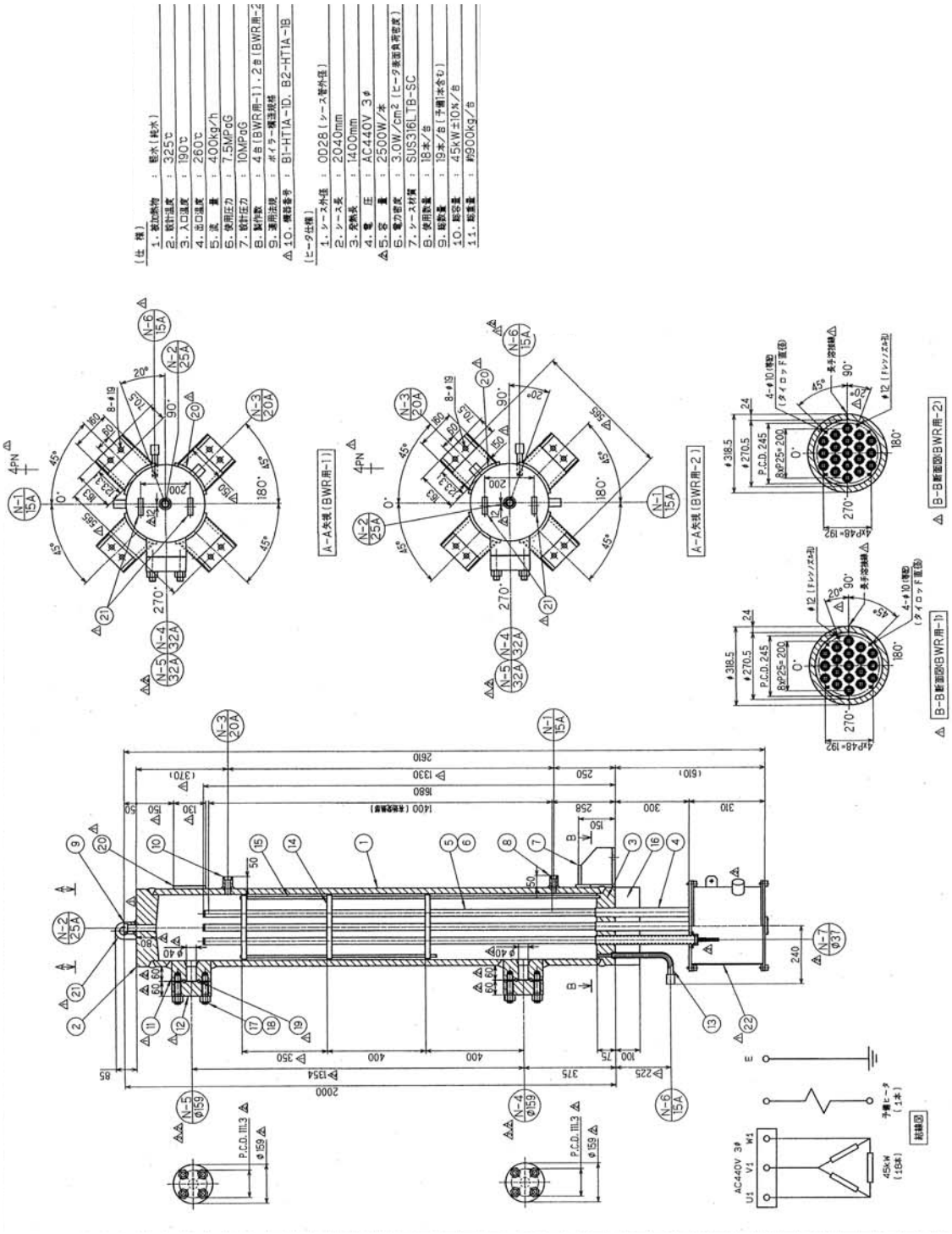



Fig.2.2-6 BWR 用加熱器の構造

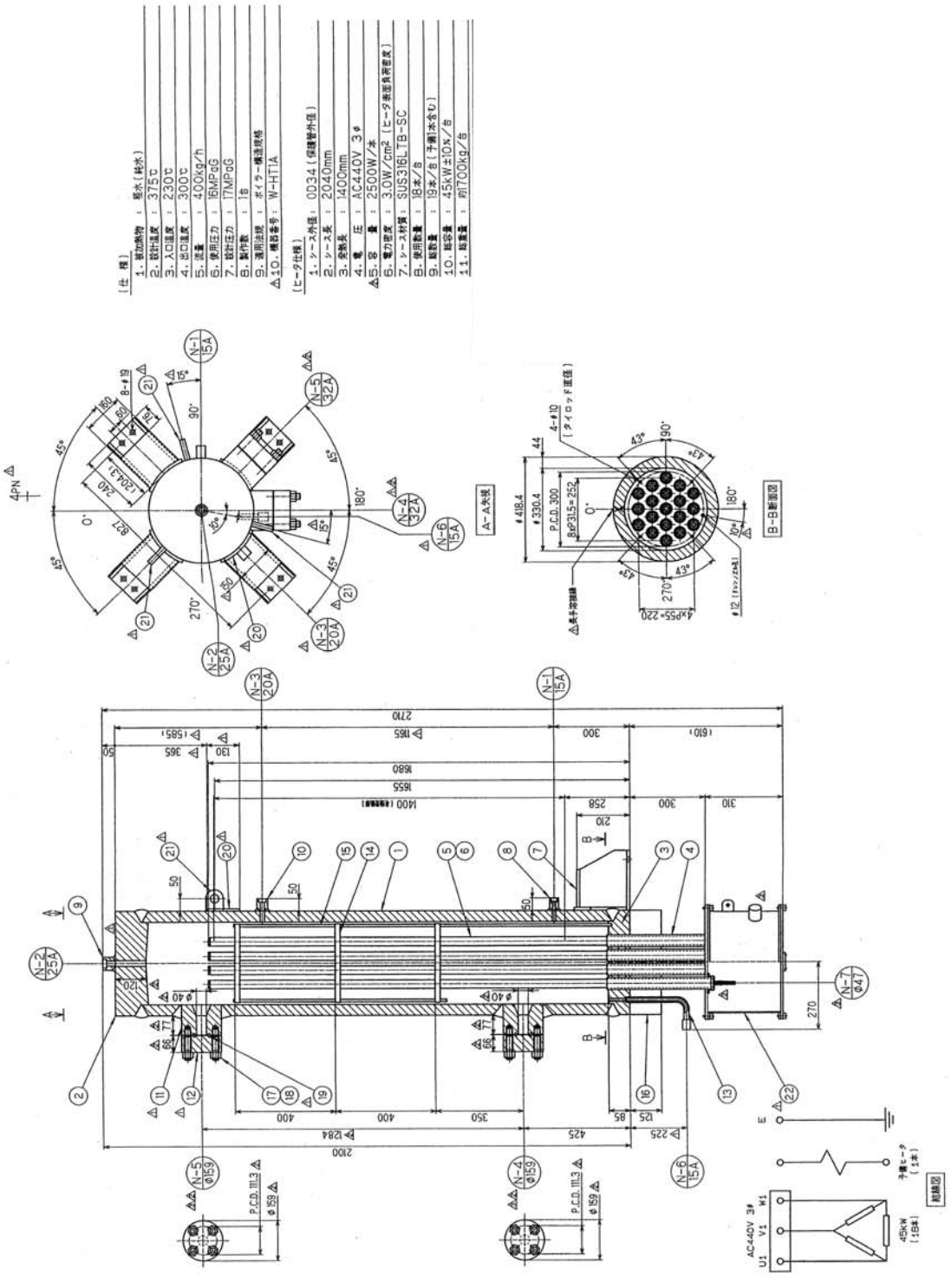



Fig.2.2-7 水化学用加熱器の構造

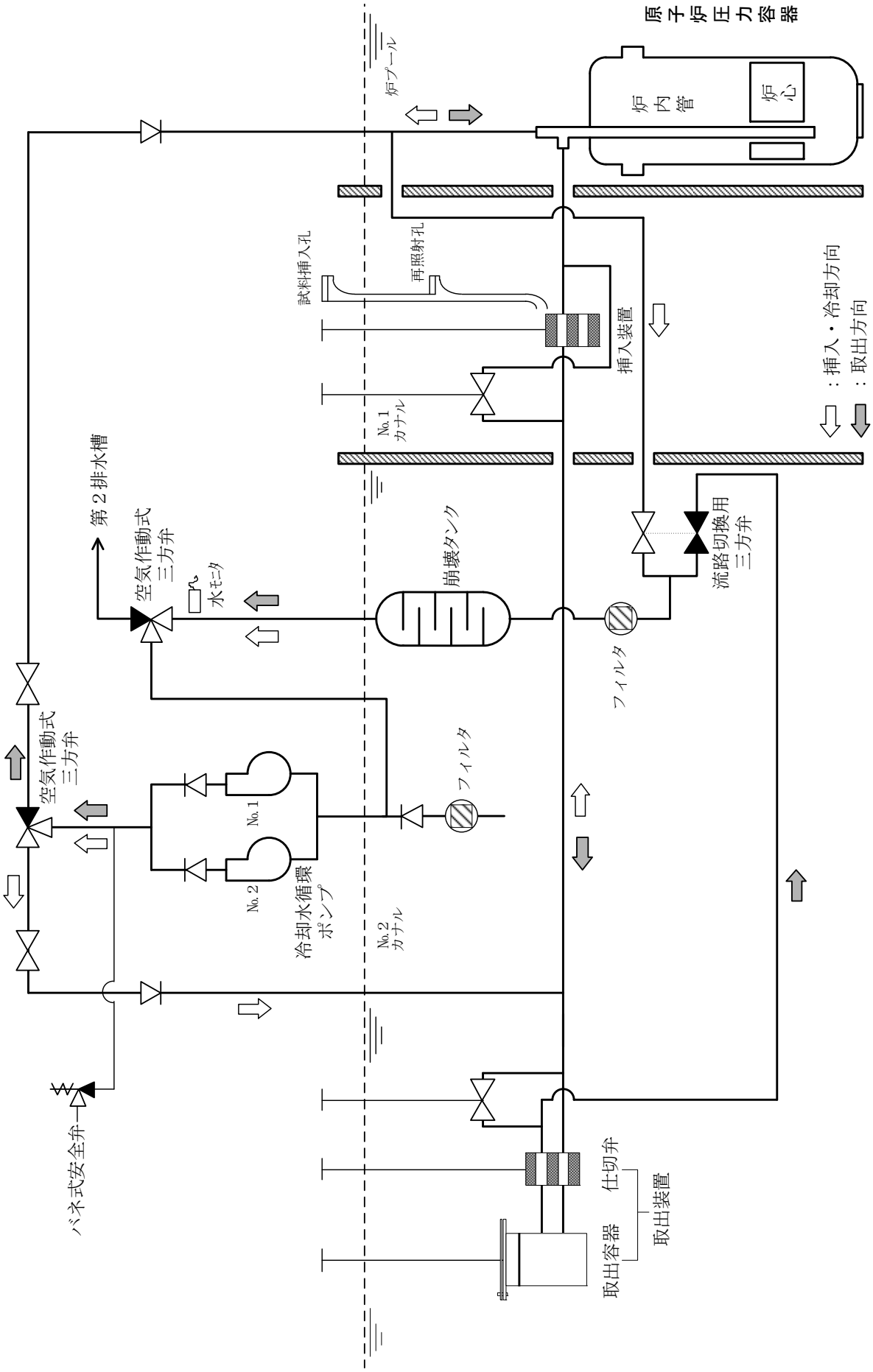



Fig.3-1 水力ラビット照射装置フローシート

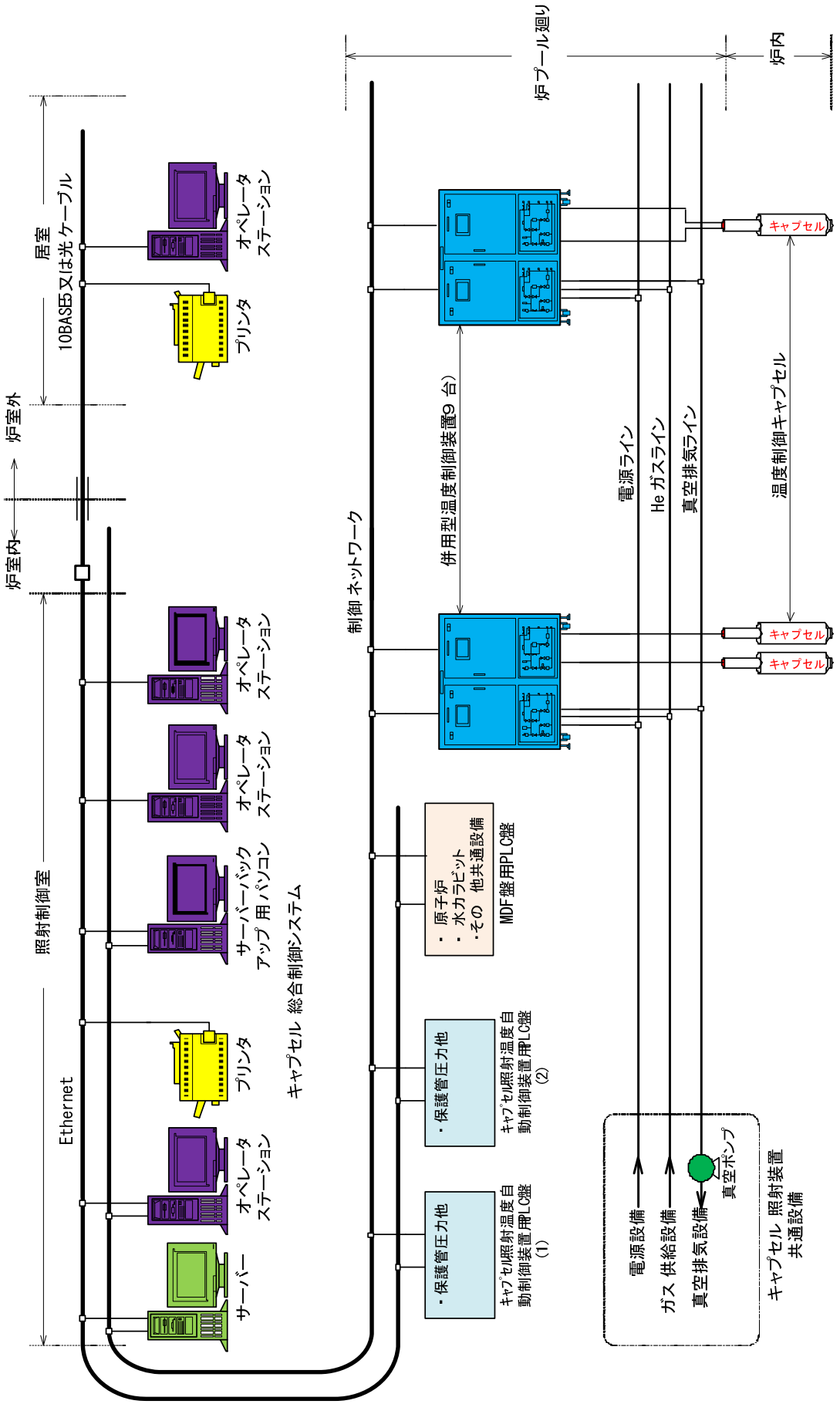



Fig.4 照射キャプセル温度制御装置の全体構成

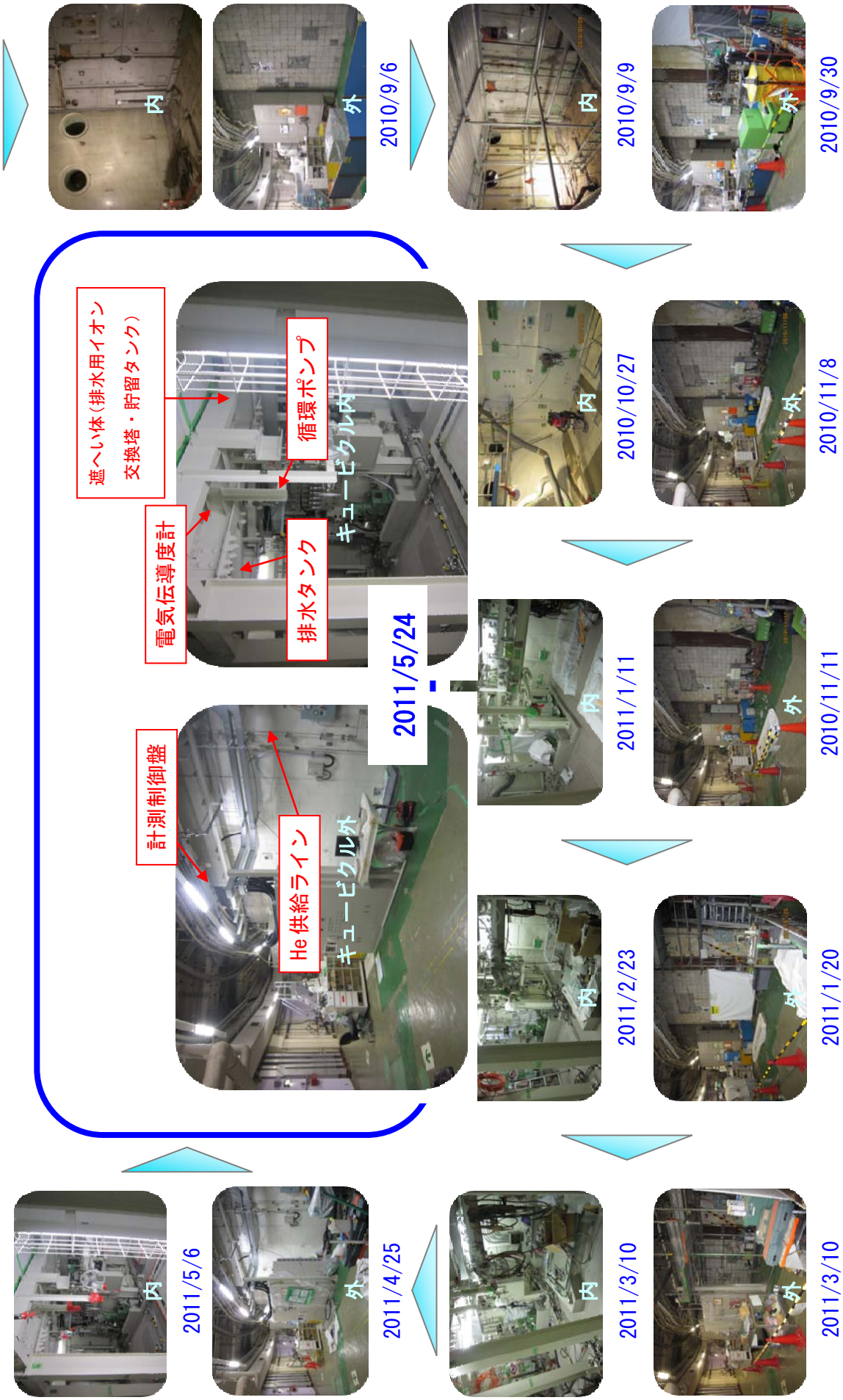



Photo 1 燃料異常過渡試験装置の据付の進捗状況

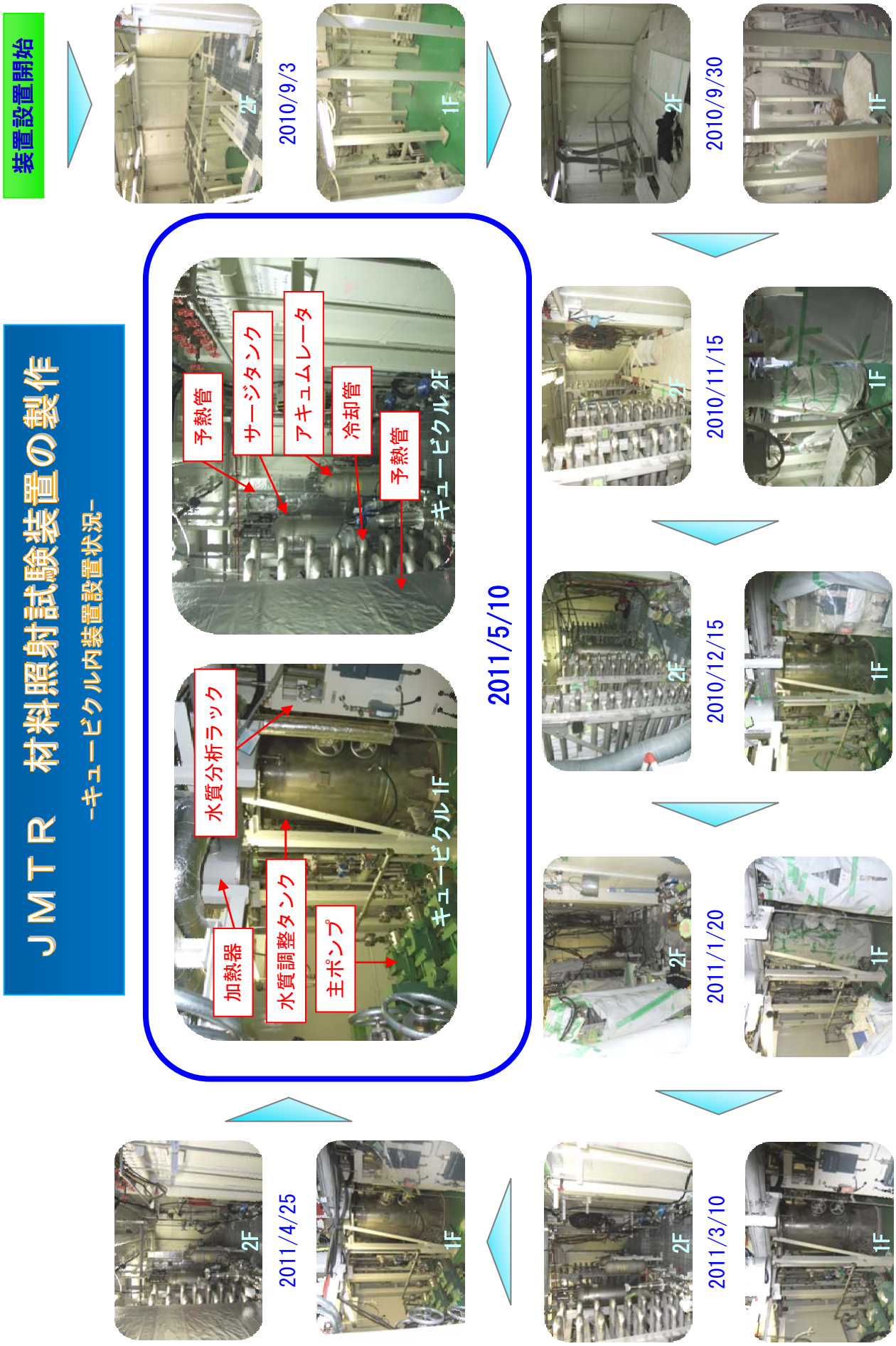



Photo 2 材料照射試験装置の据付の進捗状況

This is a blank page.

# 国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

| 基本量 | SI 基本単位 | |
|---|---|---|
| | 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 |

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

| 組立量 | SI 基本単位 | |
|---|---|---|
| | 名称 | 記号 |
| 面積 | 平方メートル | $m^2$ |
| 体積 | 立法メートル | $m^3$ |
| 速さ，速度 | メートル毎秒 | m/s |
| 加速度 | メートル毎秒毎秒 | $m/s^2$ |
| 波数 | 毎メートル | $m^{-1}$ |
| 密度，質量密度 | キログラム毎立方メートル | $kg/m^3$ |
| 面積密度 | キログラム毎平方メートル | $kg/m^2$ |
| 比体積 | 立方メートル毎キログラム | $m^3/kg$ |
| 電流密度 | アンペア毎平方メートル | $A/m^2$ |
| 磁界の強さ | アンペア毎メートル | A/m |
| 量濃度[a]，濃度 | モル毎立方メートル | $mol/m^3$ |
| 質量濃度 | キログラム毎立法メートル | $kg/m^3$ |
| 輝度 | カンデラ毎平方メートル | $cd/m^2$ |
| 屈折率[b] | （数字の）　1 | 1 |
| 比透磁率[b] | （数字の）　1 | 1 |

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

| 組立量 | SI 組立単位 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 名称 | 記号 | 他のSI単位による表し方 | SI基本単位による表し方 |
| 平面角 | ラジアン[b] | rad | 1 [b] | m/m |
| 立体角 | ステラジアン[b] | sr[c] | 1 [b] | $m^2/m^2$ |
| 周波数 | ヘルツ[d] | Hz | | $s^{-1}$ |
| 力 | ニュートン | N | | $m\ kg\ s^{-2}$ |
| 圧力，応力 | パスカル | Pa | $N/m^2$ | $m^{-1}\ kg\ s^{-2}$ |
| エネルギー，仕事，熱量 | ジュール | J | N m | $m^2\ kg\ s^{-2}$ |
| 仕事率，工率，放射束 | ワット | W | J/s | $m^2\ kg\ s^{-3}$ |
| 電荷，電気量 | クーロン | C | | s A |
| 電位差（電圧），起電力 | ボルト | V | W/A | $m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$ |
| 静電容量 | ファラド | F | C/V | $m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$ |
| 電気抵抗 | オーム | Ω | V/A | $m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$ |
| コンダクタンス | ジーメンス | S | A/V | $m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$ |
| 磁束 | ウエーバ | Wb | Vs | $m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$ |
| 磁束密度 | テスラ | T | $Wb/m^2$ | $kg\ s^{-2}\ A^{-1}$ |
| インダクタンス | ヘンリー | H | Wb/A | $m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$ |
| セルシウス温度 | セルシウス度[e] | ℃ | | K |
| 光束 | ルーメン | lm | cd sr[c] | cd |
| 照度 | ルクス | lx | $lm/m^2$ | $m^{-2}\ cd$ |
| 放射性核種の放射能[f] | ベクレル[d] | Bq | | $s^{-1}$ |
| 吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ | グレイ | Gy | J/kg | $m^2\ s^{-2}$ |
| 線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量 | シーベルト[g] | Sv | J/kg | $m^2\ s^{-2}$ |
| 酸素活性 | カタール | kat | | $s^{-1}\ mol$ |

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

| 組立量 | SI 組立単位 | | |
|---|---|---|---|
| | 名称 | 記号 | SI 基本単位による表し方 |
| 粘度 | パスカル秒 | Pa s | $m^{-1}\ kg\ s^{-1}$ |
| 力のモーメント | ニュートンメートル | N m | $m^2\ kg\ s^{-2}$ |
| 表面張力 | ニュートン毎メートル | N/m | $kg\ s^{-2}$ |
| 角速度 | ラジアン毎秒 | rad/s | $m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$ |
| 角加速度 | ラジアン毎秒毎秒 | $rad/s^2$ | $m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$ |
| 熱流密度，放射照度 | ワット毎平方メートル | $W/m^2$ | $kg\ s^{-3}$ |
| 熱容量，エントロピー | ジュール毎ケルビン | J/K | $m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$ |
| 比熱容量，比エントロピー | ジュール毎キログラム毎ケルビン | J/(kg K) | $m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$ |
| 比エネルギー | ジュール毎キログラム | J/kg | $m^2\ s^{-2}$ |
| 熱伝導率 | ワット毎メートル毎ケルビン | W/(m K) | $m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$ |
| 体積エネルギー | ジュール毎立方メートル | $J/m^3$ | $m^{-1}\ kg\ s^{-2}$ |
| 電界の強さ | ボルト毎メートル | V/m | $m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$ |
| 電荷密度 | クーロン毎立方メートル | $C/m^3$ | $m^{-3}\ sA$ |
| 表面電荷 | クーロン毎平方メートル | $C/m^2$ | $m^{-2}\ sA$ |
| 電束密度，電気変位 | クーロン毎平方メートル | $C/m^2$ | $m^{-2}\ sA$ |
| 誘電率 | ファラド毎メートル | F/m | $m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$ |
| 透磁率 | ヘンリー毎メートル | H/m | $m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$ |
| モルエネルギー | ジュール毎モル | J/mol | $m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$ |
| モルエントロピー, モル熱容量 | ジュール毎モル毎ケルビン | J/(mol K) | $m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$ |
| 照射線量（X 線及びγ線） | クーロン毎キログラム | C/kg | $kg^{-1}\ sA$ |
| 吸収線量率 | グレイ毎秒 | Gy/s | $m^2\ s^{-3}$ |
| 放射強度 | ワット毎ステラジアン | W/sr | $m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$ |
| 放射輝度 | ワット毎平方メートル毎ステラジアン | $W/(m^2\ sr)$ | $m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$ |
| 酵素活性濃度 | カタール毎立方メートル | $kat/m^3$ | $m^{-3}\ s^{-1}\ mol$ |

表５．SI 接頭語

| 乗数 | 接頭語 | 記号 | 乗数 | 接頭語 | 記号 |
|---|---|---|---|---|---|
| $10^{24}$ | ヨタ | Y | $10^{-1}$ | デシ | d |
| $10^{21}$ | ゼタ | Z | $10^{-2}$ | センチ | c |
| $10^{18}$ | エクサ | E | $10^{-3}$ | ミリ | m |
| $10^{15}$ | ペタ | P | $10^{-6}$ | マイクロ | μ |
| $10^{12}$ | テラ | T | $10^{-9}$ | ナノ | n |
| $10^{9}$ | ギガ | G | $10^{-12}$ | ピコ | p |
| $10^{6}$ | メガ | M | $10^{-15}$ | フェムト | f |
| $10^{3}$ | キロ | k | $10^{-18}$ | アト | a |
| $10^{2}$ | ヘクト | h | $10^{-21}$ | ゼプト | z |
| $10^{1}$ | デカ | da | $10^{-24}$ | ヨクト | y |

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

| 名称 | 記号 | SI 単位による値 |
|---|---|---|
| 分 | min | 1 min=60s |
| 時 | h | 1h =60 min=3600 s |
| 日 | d | 1 d=24 h=86 400 s |
| 度 | ° | 1°=(π/180) rad |
| 分 | ’ | 1’=(1/60)°=(π/10800) rad |
| 秒 | ” | 1”=(1/60)’=(π/648000) rad |
| ヘクタール | ha | $1ha=1hm^2=10^4m^2$ |
| リットル | L, l | $1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$ |
| トン | t | $1t=10^3$ kg |

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|---|---|---|
| 電子ボルト | eV | $1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$ |
| ダルトン | Da | $1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$ |
| 統一原子質量単位 | u | 1u=1 Da |
| 天文単位 | ua | $1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$ |

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|---|---|---|
| バール | bar | $1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$ |
| 水銀柱ミリメートル | mmHg | 1mmHg=133.322Pa |
| オングストローム | Å | $1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$ |
| 海里 | M | 1 M=1852m |
| バーン | b | $1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$ |
| ノット | kn | 1 kn=(1852/3600)m/s |
| ネーパ | Np | SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。 |
| ベル | B | |
| デジベル | dB | |

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|---|---|---|
| エルグ | erg | $1\ erg=10^{-7}\ J$ |
| ダイン | dyn | $1\ dyn=10^{-5}N$ |
| ポアズ | P | $1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$ |
| ストークス | St | $1\ St\ =1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$ |
| スチルブ | sb | $1\ sb\ =1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$ |
| フォト | ph | $1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$ |
| ガル | Gal | $1\ Gal\ =1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$ |
| マクスウェル | Mx | $1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$ |
| ガウス | G | $1\ G\ =1Mx\ cm^{-2}\ =10^{-4}T$ |
| エルステッド[c] | Oe | $1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$ |

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

| 名称 | 記号 | SI 単位で表される数値 |
|---|---|---|
| キュリー | Ci | $1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$ |
| レントゲン | R | $1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$ |
| ラド | rad | $1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$ |
| レム | rem | $1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$ |
| ガンマ | γ | 1 γ =1 nT=10-9T |
| フェルミ | | 1フェルミ=1 fm=10-15m |
| メートル系カラット | | 1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg |
| トル | Torr | 1 Torr = (101 325/760) Pa |
| 標準大気圧 | atm | 1 atm = 101 325 Pa |
| カロリー | cal | 1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー） |
| ミクロン | μ | $1\ \mu\ =1\mu m=10^{-6}m$ |

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています