

シュラウド照射装置の炉内管及び 飽和温度キャプセルの耐震設計

Seismic Analysis for Shroud Facility In-pile Tube
and Saturated Temperature Capsules

飯村 光一 山浦 高幸 小川 光弘

Koichi IIMURA, Takayuki YAMAURA and Mitsuhiro OGAWA

大洗研究開発センター

照射試験炉センター

原子炉施設管理部

Department of JMTR Operation

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center

Oarai Research and Development Center

July 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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, 2009

シュラウド照射装置の炉内管及び飽和温度キャプセルの耐震設計

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 原子炉施設管理部

飯村 光一、山浦 高幸、小川 光弘

(2009 年 4 月 24 日受理)

独立行政法人日本原子力研究開発機構では、軽水炉利用の高度及び長期化に対応するため、軽水炉燃料及び材料の照射試験を実施する準備を進めている。

大洗研究開発センターでは、平成 23 年度に材料試験炉(以下「JMTR」という。)を再稼働する予定で改修が進められており、軽水炉燃料及び材料の健全性を確認するための照射試験装置の整備はこの改修と並行して進められている。

燃料の照射試験は、シュラウド照射装置(以下「OSF-1」という。)と He-3 出力制御型沸騰水キャプセル照射装置(以下「BOCA 照射装置」という。)とを組み合わせ出力急昇試験を行い、軽水炉の異常過渡時における燃料の健全性を確認するものである。また、OSF-1 は、原子炉の運転中に照射試料の挿入及び取出しが行えるシュラウド型の照射装置であり、「炉内管」、「循環系」及び「キャプセル交換機」から構成される。また、BOCA 照射装置は、軽水炉の照射環境を模擬する装置であり「沸騰水キャプセル本体」、「キャプセル制御装置」及び「ヘリウム-3 出力可変装置」から構成されるものである。

材料の照射試験は、「飽和温度キャプセル」と「照射環境制御装置」とを組み合わせ、軽水炉の水環境を模擬した状態で、材料に発生する照射誘起応力腐食割れ等の発生メカニズムを把握する。

これらの照射装置は、現在 JMTR で供用中の装置であるが、再稼働後における照射計画に対応させるため、更新または改造を行うことから、平成 19 年度に新たな条件で詳細設計を行った。

詳細設計のうち、各装置の耐震設計は、試験研究用原子炉施設に関する構造等の技術基準及び原子力発電所耐震設計技術指針に従い、機器区分並びに各運転状態を整理し、有限要素法配管解析コード「SAP」及び有限要素法構造解析コード「ABAQUS」により応力評価を行い、発生応力に対して装置が健全であることを確認した。

本報告書は、経済産業省 原子力安全・保安院の受託研究「平成 19 年度軽水炉燃材料詳細健全性調査」として(独)日本原子力研究開発機構が実施した成果の一部である。

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

Seismic Analysis for Shroud Facility In-pile Tube and Saturated Temperature Capsules

Koichi IIMURA, Takayuki YAMAURA and Mitsuhiro OGAWA

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

(Received April 24, 2009)

At Oarai Research and Development Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA), the plan of repairing and refurbishing Japan Materials Testing Reactor (JMTR) has progressed in order to restart JMTR operation in the fiscal 2011. As a part of effective use of JMTR, the neutron irradiation tests of LWR fuels and materials has been planned in order to study their soundness.

By using Oarai Shroud Facility (OSF-1) and Fuel Irradiation Facility with the He-3 gas control system for power lamping test using Boiling Water Capsules (BOCA Irradiation Facility), the irradiation tests with power ramping will be carried out to study the soundness of fuel under LWR Transient condition. OSF-1 is the irradiation facility of shroud type that can insert and eject the capsule under reactor operation, and is composed of "In-pile Tube", "Cooling system" and "Capsule exchange system". BOCA Irradiation Facility is the facility which simulates irradiation environment of LWR, and is composed of "Boiling water Capsule", "Capsule control system" and "Power control system by He-3".

By using Saturated temperature Capsules and the water environment control system, the material irradiation tests under the water chemistry condition of LWR will be carried out to clarify the mechanism of IASCC.

In JMTR, these facilities are in service at the present. However, the detailed design for renewal or remodeling was carried out based on the new design condition in order to be correspondent to the irradiation test plan after restart JMTR operation.

In this seismic analysis of the detailed design, each equipment classification and operating state were arranged with "Japanese technical standards of the structure on nuclear facility for test research" and "Technical guidelines for seismic design of nuclear power plants on current, and then, stress calculation and evaluation were carried out by FEM piping analysis code "SAP" and structure analysis code "ABAQUS". About the stress of the seismic force, it was proven that these facilities have the soundness.

It was proven by the analysis that these facilities maintain the structural integrity under earthquake condition.

Keywords : In-pile Tube, Saturated Temperature Capsule, Seismic Analysis, FEM, OSF-1, JMTR

This study was conducted under a contract with the Nuclear and Industrial safety Agency of the Ministry of Economy, Trade and Industry.

目 次

1. まえがき	1
2. 照射装置の概要	1
2.1 OSF-1 及び BOCA 照射装置の概要	1
2.2 飽和温度キャプセルの概要	2
3. 計算条件	2
3.1 計算モデル	2
3.2 機器区分	3
3.3 設計地震力	3
3.4 荷重条件	4
3.5 荷重の組合せと許容応力状態	4
3.6 温度及び圧力条件	4
3.7 応力評価条件	5
4. 耐震応力計算	6
4.1 耐震計算方法	6
4.2 応力計算方法	6
4.3 計算結果	6
5. 結 論	9
謝 辞	9
参考文献	9

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Irradiation Facilities	1
2.1 OSF-1 and BOCA	1
2.2 Saturated Temperature Capsule	2
3. Analysis Condition	2
3.1 Modeling of Analysis	2
3.2 Classification	3
3.3 Seismic Force of Design	3
3.4 Loading Condition	4
3.5 Combination of Loadings and Allowable stress condition	4
3.6 Temperature and Pressure condition	4
3.7 Stress evaluation Criteria	5
4. Stress calculation of Seismic Force	6
4.1 Calculation Method of Seismic	6
4.2 Calculation Method of Stress	6
4.3 Result of Analyses	6
5. Conclusion	9
Acknowledgements	9
References	9

1. まえがき

独立行政法人日本原子力研究開発機構では、軽水炉利用の高度及び長期化に対応するため、軽水炉燃料及び材料の照射試験を実施する準備を進めている。

大洗研究開発センターでは、平成 23 年度に材料試験炉(以下「JMTR」という。)を再稼働する予定で改修が進められており、軽水炉燃料及び材料の健全性を確認するための照射試験装置の整備はこの改修と並行して進められている。

照射試験のうち、燃料については、シュラウド照射装置(以下「OSF-1」という。)と He-3 出力制御型沸騰水キャプセル照射装置(以下「BOCA 照射装置」という。)を組み合わせ出力急昇試験を行い、軽水炉の異常過渡時における燃料の健全性を確認する。また、材料については飽和温度キャプセルと照射環境制御装置を組み合わせ、軽水炉の水環境を模擬した状態で、材料に発生する照射誘起応力腐食割れ等の発生メカニズムを把握する。

これらの照射装置は、現在 JMTR で供用中の装置であるが、再稼働後における照射計画に対応させるため、更新または改造を行うことから、平成 19 年度に新たな条件で詳細設計を行った。

詳細設計のうち、各装置の耐震設計は、試験研究用原子炉施設に関する構造等の技術基準及び原子力発電所耐震設計技術指針に従い機器区分並びに各運転状態を整理し、有限要素法配管解析コード「SAP. Ver V」及び有限要素法構造解析コード「ABAQUS. Ver6. 6」により応力評価を行い、発生応力に対する各装置の健全性の確認を行った。

本書は、軽水炉燃料及び材料の中性子照射試験を行う照射装置のうち、原子炉容器内に装荷される OSF-1 炉内管及び飽和温度キャプセルの耐震設計^{[1] [2]}についてまとめたものである。

2. 照射装置の概要

2.1 OSF-1 及び BOCA 照射装置の概要

OSF-1 は、原子炉の運転中に照射試料の挿入及び取出しが行えるシュラウド型の照射装置であり、「炉内管」「循環系」「キャプセル交換機」から構成される。

「炉内管」は、原子炉容器内の炉心格子位置に装荷されており、照射試料であるキャプセルの照射に用いられる。「循環系」は、照射試料の発熱除去を行う系統である。また、キャプセル交換機は、照射計画に合わせ、OSF-1 炉内管から照射試料であるキャプセルの挿入・取出しを行う機器である。

BOCA 照射装置は、「沸騰水キャプセル本体」、「キャプセル制御装置」及び「ヘリウム-3 出力可変装置」から構成される。

「沸騰水キャプセル本体」は、燃料試料を封入する容器であり、OSF-1 の炉内管に挿入される。「キャプセル制御装置」は、沸騰水キャプセル本体の照射環境を軽水炉の炉内環境に模擬して制御するものである。また「ヘリウム-3 出力可変装置」は、照射試料の周囲に配置したガススクリーンのヘリウム-3 ガス圧力を変化させることで燃料試料の出力を調整するものである。なお、OSF-1 は、BOCA 照射装置と組合わせて照射試験を行うものである。OSF-1 と BOCA 照射装置の概略構成図を Fig. 1 に、OSF-1 炉内管の概略構造図を Fig. 2 示す。

2.2 飽和温度キャプセルの概要

飽和温度キャプセルは、「キャプセル本体」、「保護管」及び「照射環境制御装置」から構成される。

「キャプセル本体」は、材料試料を封入する容器であり、任意の炉心格子位置に挿入される。「保護管」は、キャプセル本体から制御管及び計装線等を原子炉容器外に導くためのものである。また「照射環境制御装置」は、キャプセル本体の照射環境を軽水炉の水環境に模擬して制御するものである。飽和温度キャプセルと照射環境制御装置の概略構成図を Fig. 3 に示す。

3. 計算条件

計算条件は、原子炉設置変更許可申請書の耐震設計から要求される機器構造物の重要度分類を行い、重要度に応じた静的設計地震力と J M T R 建家地震応答解析による床応答スペクトルを用いた動的地震力を用いるものとし、荷重は、圧力、自重、熱及び耐震計算で得られた地震力を付加するものとした。OSF-1 炉内管の要素仕様を Table 1 に、飽和温度キャプセルの要素仕様を Table 2 に、OSF-1 炉内管の集中重量を Table 3 に、拘束、結合条件を Table 4 に、OSF-1 冷却系配管反力を Table 5 に示す。

3.1 計算モデル

(1) OSF-1 炉内管

OSF-1 の計算モデルは、固有振動数が最も低くなると想定される沸騰水キャプセルを炉内管に全部挿入した状態でキャプセル交換機を含む連成モデルとした。炉内管を構成する圧力管及び流路仕切管等の各部は等価な断面定数を有する配管要素でモデル化し、各部相互のスペーサ部はバネ要素で結合した。また、グリッド部については周辺要素による等価な曲げ剛性を、炉プール内振動時の水の効果については付加重量を考慮した。なお、ガススクリーンは二次元軸対称回転体にモデル化した。OSF-1 炉内管の計算モデル図を Fig. 4 に、ガススクリーンの計算モデル図を Fig. 5 に示す。

(2) 飽和温度キャプセル

飽和温度キャプセルは、種類毎にグループを 5 ケースに分け、原子炉容器に装荷されるキャプセル本体及び保護管について等価な断面定数を有する配管要素でモデル化した。また、炉プール内振動時の水の効果については付加重量を考慮した。以下にグループ毎の概略を示す。

飽和温度キャプセルの計算モデル図を Fig. 6 に示す。飽和温度キャプセルの計算モデル寸法を Table 6 に示す。

グループ	キャプセル	照射孔
I	IASCC ベース	K-6、G-6
II	IASCC 照射下ベース	O-6、O-11、M-13、L-13 F-13、D-12
III	Hf-WCU 照射ベース	M-6、M-10
IV	Hf-He 照射ベース	G-10
	大型試験片	G、H-3、4
V	通常キャプセル	F-4

3.2 機器区分

OSF-1 炉内管及び飽和温度キャプセルの試験研究用原子炉施設に関する構造等の技術基準(以下「研究炉技術基準」という。)から要求される機器区分及び原子炉発電所耐震設計技術指針(以下「JEAG4601」という。)から要求される重要度分類を以下に示す。

なお、評価する運転状態は、運転状態Ⅰ、運転状態Ⅱ、運転状態Ⅲとし、許容応力状態は運転状態に対応するⅠ_A、Ⅱ_A及びⅢ_ASとした。

(1) 機器区分及び重要度分類

1) OSF-1 炉内管

OSF-1 炉内管を構成する機器毎の機器区分及び重要度分類は以下のとおりとした。

① 圧力管

機器区分 : 第3種管 (炉心領域または反射体領域にある照射用管)
重要度分類 : Aクラス

② 流路仕切管

機器区分 : — (機器区分外)
重要度分類 : Aクラス(準用)

③ ガスクリーン

機器区分 : 第4種容器 (内包する流体の放射性物質の濃度が 37mBq/cm³ 以上の容器)
重要度分類 : Aクラス(準用)

2) 飽和温度キャプセル

飽和温度キャプセルを構成する機器毎の機器区分及び重要度分類は以下のとおりとした。

① キャプセル本体

機器区分 : 第3種管 (炉心領域または反射体領域にある照射用管)
重要度分類 : Aクラス

② 保護管

機器区分 : 第3種管 (炉心領域または反射体領域にある照射用管)
重要度分類 : Aクラス

3.3 設計地震力

(1) 静的設計地震力

静的設計地震力は、OSF-1 及び飽和温度キャプセルが原子炉設置変更許可申請書の「耐震設計」で示される重要機器に相当するため、重要機器の設計震度を2割増した値とした。

重要機器 : 水平方向 $0.6 \times 1.2 = 0.72G$
垂直方向 $0.3 \times 1.2 = 0.36G$

(2) 動的地震力

動的地震力は、JMT R建家地震応答解析による床応答スペクトル(減衰比 1%) から、各拘束点にあたるフロアーの床応答スペクトルを重ね合わせ、解析に用いる床応答スペクトルとした。解析に使用した床応答スペクトル図をFig. 7に示す。

1) OSF-1 炉内管

炉内管の拘束点の炉容器頂部および炉内グリッドとキャプセル交換機の設置されている炉室 1F のものを包絡して用いた。サポートアームの取付点の床応答スペクトルは炉容器頂部および炉内グリッドの床応答スペクトルに包絡されているものとした。

2) 飽和温度キャプセル

キャプセル本体および保護管の拘束点の炉容器頂部および炉内グリッドの床応答スペクトルを包絡して用いた。サポートの取付点の床応答スペクトルは炉容器頂部および炉内グリッドの床応答スペクトルに包絡されているものとした。

3.4 荷重条件

OSF-1 炉内管の荷重条件は、通常運転時における圧力、自重及び地震とし、接続する冷却系配管からの熱膨張反力および地震時配管反力を考慮する。また、ガススクリーンについては、炉内管の熱的計算から求められる境界条件（流体の温度と熱伝達係数）と、発熱条件から応力計算用要素分割の各節点位置の温度を求め、その温度分布による熱応力と圧力管および流路仕切管の耐震計算で得られた地震力を用いる。なお、飽和温度キャプセルの荷重条件は、通常運転時における圧力、自重、熱膨張及び地震とする。

3.5 荷重の組合せと許容応力状態

(1) OSF-1 炉内管

圧力管及び流路仕切管の荷重の組合せは圧力、自重に接続配管の熱膨張反力を組み合わせた状態を許容応力状態 I_A として評価し、通常運転時の圧力、自重に地震を加えたものを許容応力状態 $III_A S$ として評価する。また、ガススクリーンは、運転時の圧力と熱応力を組み合わせた状態を許容応力状態 I_A として評価し、さらに地震を重ねた状態を $III_A S$ で評価する。なお、地震力は動的、静的地震力のうち大きい方を採用する。

OSF-1 炉内管の荷重の組合せと許容応力状態を Table 7 に、ガススクリーンの荷重の組合せと許容応力状態を Table 8 に示す。

(2) 飽和温度キャプセル

キャプセル本体及び保護管の荷重の組合せは、圧力、自重、熱膨張を組み合わせた状態を許容応力状態 I_A 、 II_A として評価し、通常運転時の圧力、自重に地震を加えたものを許容応力状態 $III_A S$ として評価する。なお、地震力は動的、静的地震力のうち大きい方を採用する。

3.6 温度及び圧力条件

温度及び圧力条件は次のとおりとした。

(1) OSF-1 炉内管

1) 最高使用温度

圧力管	: 90℃
流路仕切管	: 90℃
ガススクリーン	: 95℃

2) 最高使用圧力

圧力管	: 1.76MPa
流路仕切管	: 0.29MPa (差圧)
ガスクリーン	: 4.41MPa (内圧)
	1.86MPa (外圧)

(2) 飽和温度キャプセル

飽和温度キャプセルの温度及び圧力条件は、構造の特徴で5つのグループに分けて設定した。
飽和温度キャプセルの温度及び圧力条件を Table 9 に示す。

3.7 応力評価条件

応力評価条件は、研究炉技術基準に従い次のとおりとした。また、適用応力評価基準の評価項目と許容応力の詳細を Table 1 0、Table 1 1、Table 1 2 及び Table 1 3 に示す。

(1) OSF-1 炉内管

1) 圧力管

評価基準：第3種管で規定する 第38条（材料の許容応力）及び、第44条（解析による設計）について評価する。

2) 流路仕切管

評価基準：第4種管の基準を準用する。また、第3種管 第44条（解析による設計）についても評価する。

3) ガスクリーン

評価基準：第4種容器管の基準に準拠する。また、第3種容器 第16条（解析による設計）についても評価する。

(2) 飽和温度キャプセル

1) キャプセル本体

評価基準：第3種管 第38条（材料の許容応力）の他に、第44条（解析による設計）についても評価する

2) 保護管

評価基準：第3種管 第38条（材料の許容応力）の他に、第44条（解析による設計）についても評価する

4. 耐震応力計算

計算は、沸騰水キャプセルを OSF-1 炉内管に全部挿入した状態と飽和温度キャプセルを原子炉容器に設置した状態の 2 ケースについて行った。また、地震慣性力による応力は、水平方向については動的計算及び静的計算で求めた応力のうち大きい方を付加するまた、鉛直方向については静的計算で求めた応力を不利な方向に組合せる。なお、OSF-1 炉内管については外圧制限の評価も合わせて実施した。

4.1 耐震計算方法

(1) 動的慣性計算

モーダル床応答スペクトル法を用い、20Hz 以下のモードを SRSS 法（2 乗和の平方根）により合成する。計算は水平 2 方向について行う。

(2) 静的慣性計算

各質点に静的震度を加えて水平 2 方向及び鉛直方向についてそれぞれ計算する。

4.2 応力計算方法

OSF-炉内管を構成する圧力管、流路仕切管及び飽和温度キャプセルの応力計算は有限要素法配管解析コード「SAP」を、ガススクリーンの温度分布、応力解析は汎用有限要素法構造解析コード「ABAQUS」を用いる。

4.3 計算結果

(1) OSF-1 炉内管の計算結果

圧力管及び流路仕切管は、1 次モードで 4.1Hz、発生応力の最大は、評価点 20 の「短期的機械荷重及び地震力」で 198N/mm^2 であった。この値は許容応力 (360N/mm^2) 以下であり、発生応力に対して健全である結果となった。OSF-1 炉内管の応力評価結果を Table 1 4 から Table 1 5 に、OSF-1 炉内管の固有振動数及び応答加速度を Table 1 6 に、発生応力におけるモーメント成分（一例）を Table 1 7 に示す。また、OSF-1 炉内管の振動モード図を Fig. 8 に、応答加速度分布を Fig. 9 に、応力評価箇所を Fig. 1 0 に示す。

(2) ガススクリーンの計算結果

ガススクリーンに発生する応力の最大は、評価断面 4 の内側で 47N/mm^2 であった。この値は許容応力 (94N/mm^2) 以下であり、発生応力に対して健全である結果となった。応力評価結果を Table 1 8 から Table 1 9 に、ガススクリーン温度分布計算結果を Fig. 1 1 に、各荷重によるガススクリーン応力分布を Fig. 1 2 に示す。

(3) OSF-1 炉内管の外圧制限の評価

炉内管の外圧制限の評価を行った。評価は試験研究炉第 3 種容器第 1 6 条（解析による設計）の規程を適用した。

- 1) 圧力管 ($110^{0D} \times 9.9^t \times 145^L$ 、ジルカロイ-2)

$$Do/t = 110/9.9 = 11.1$$

$$\ell/Do = 145/110 = 1.32$$

Fig. 1 3 「ジルカロイ-2 の荷重計算用図」より、

$$A = 0.027, B = 874$$

$$Pa = \frac{4Bt}{3Do} = 104.8 \text{ kg/cm}^2 = 10.2 \text{ MPa}$$

- ① 運転状態 I、II

$$Pe = 1.76 \text{ MPa} < Pa = 10.2 \text{ MPa}$$

- ② 試験状態

$$Pe = 2.64 \text{ MPa} < 1.35 Pa (Pa = 10.2 \text{ MPa})$$

- 2) 圧力管 ($101.6^{0D} \times 5.7^t \times 4225^L$ 、ジルカロイ-2)

$$Do/t = 101.6/5.7 = 17.8$$

$$\ell/Do = 4225/101.6 = 41.6$$

Fig. 1 3 「ジルカロイ-2 の荷重計算用図」より、

$$A = 0.0032, B = 874$$

$$Pa = \frac{4Bt}{3Do} = 65.3 \text{ kg/cm}^2 = 6.41 \text{ MPa}$$

- ① 運転状態 I、II

$$Pe = 1.76 \text{ MPa} < Pa = 6.41 \text{ MPa}$$

- ② 試験状態

$$Pe = 2.64 \text{ MPa} < 1.35 Pa (Pa = 6.41 \text{ MPa})$$

- 3) 圧力管 ($69^{0D} \times 3.5^t \times 2650^L$ 、ジルカロイ-2)

$$Do/t = 69/3.5 = 19.7$$

$$\ell/Do = 2650/69 = 38.4$$

Fig. 1 3 「ジルカロイ-2 の荷重計算用図」より、

$$A = 0.0029, B = 874$$

$$Pa = \frac{4Bt}{3Do} = 59.1 \text{ kg/cm}^2 = 5.79 \text{ MPa}$$

- ① 運転状態 I、II

$$Pe = 1.76 \text{ MPa} < Pa = 5.79 \text{ MPa}$$

- ② 試験状態

$$Pe = 2.64 \text{ MPa} < 1.35 Pa (Pa = 5.79 \text{ MPa})$$

- (4) 流路仕切管

流路仕切管には外圧は加わらない。

以上より、炉内管は外圧制限の規程を満足する。

(5) ガススクリーンの外圧制限の評価

ガススクリーンの内筒部および外筒部の外圧制限の評価を行った。評価は試験研究炉第3種容器第16条（解析による設計）の規程を適用した。

1) 内筒部 ($39^{0D} \times 2.5^t \times 540^L$ 、A6061T6)

$$Do/t = 39/2.5 = 15.6$$

$$\ell/Do = 540/39 = 13.85$$

Fig. 1 3 「ジルカロイ-2 の荷重計算用図」より、

$$A = 0.0048, B = 63.7$$

$$Pa = \frac{4Bt}{3Do} = 5.44$$

① 運転状態 I、II

$$Pe = 4.41MPa < Pa = 5.44MPa$$

② 試験状態

$$Pe = 5.51MPa < 1.35Pa(Pa = 5.44MPa)$$

2) 外筒部 ($54^{0D} \times 2.5^t \times 540^L$ 、A6061T6)

$$Do/t = 54/2.5 = 21.6$$

$$\ell/Do = 540/54 = 10.0$$

Fig. 1 3 「ジルカロイ-2 の荷重計算用図」より、

$$A = 0.0025, B = 60.8$$

$$Pa = \frac{4Bt}{3Do} = 3.75$$

① 運転状態 I、II

$$Pe = 1.86MPa < Pa = 3.75MPa$$

② 試験状態

$$Pe = 2.74MPa < 1.35Pa(Pa = 2.74MPa)$$

以上より、ガススクリーンは外圧制限の規程を満足する。

(6) 飽和温度キャプセルの計算結果

飽和温度キャプセルの固有振動数は、Hf-He 照射-G10 キャプセルの1次モードで5.5Hzであった。また、地震時の応力については許容値を十分に満足しているが、一部に熱膨張応力が許容値を越えた部分がある。これは、解析に用いる設定温度を、保守的に使用温度よりも高く設定したこと及びレジューサ部の形状を暫定的に設定したことから応力係数が大きくなり、許容値を越えたものである。従って実際の使用温度及びレジューサ形状においては問題ないと思われるが、本計算結果を参考とし、実際の製作時に反映させるものとする。飽和温度キャプセルの応力評価結果(Hf-He 照射-G10 一例)を Table 2 0 に、固有振動数および応答加速度(Hf-He 照射-G10 一例)を Table 2 1 に示す。また、飽和温度キャプセルの振動モード図(Hf-He 照射-G10 一例)を Fig. 1 4 に、応答加速度分布(Hf-He 照射-G10 一例)を Fig. 1 5 に示す。

5. 結 論

OSF-1 炉内管及び飽和温度キャプセルの耐震評価は、実際の照射試験における運転状態を模擬した計算モデルを作成し、静的設計地震力と JMTR 床応答スペクトルを用いて耐震計算を実施し、有限要素法配管解析コード「SAP」及び汎用有限要素法構造解析コード「ABAQUS」を用いて応力解析を行った結果、試験研究炉技術基準並びに JAEG4601 の許容応力を満足し構造の健全性を確認した。また、OSF-1 炉内管及びガススクリーンについては、試験研究炉技術基準から要求される外圧制限の評価を合わせて行い何れも許容値を満足する結果が得られた。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、ご指導を頂きました河村弘・照射試験炉センター長、新見素二・原子炉施設管理部長、内容について貴重なご意見を頂きました菅野勝・原子炉施設管理部照射設備整備課長に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 菅野 勝, 小山 昇, 石井 忠彦, 中崎 長三郎, 荒瀬 功: “OSF-1 炉内管の He-3 ガススクリーン付仕切管の製作 ”, JAERI-Tech 97-042 (1997)
- [2] 菅野 勝, 小山 昇, 石井 忠彦, 富田 健司, 中崎 長三郎, 荒瀬 功: 私信 (1998)

Table 1 OSF-1 炉内管の要素仕様

名称	記号	節点番号	管形状 (mm)		材質	管重量 (N/m)	温度 (°C)	備 考
			外径	肉厚				
圧力管	A1	54～56	99	12.5	SUS316	383.4	55	
	A2	52～54	150	15	SUS316	783.6	55	
	A3	49～52	150	15	Zr-2	694.3	55	
	A4	47～49	110	9.9	Zr-2	293.2	55	
	A5	40～47	101.6	5.7	Zr-2	190.3	55	
	A6	37～40	69.0	3.5	Zr-2	83.0	55	
	A7	35～37	69.0	3.5	Zr-2	101.0	75	
	A8	34～35	69.0	3.5	Zr-2	66.5	75	
	A9	32～34	69.0	3.5	Zr-2	83.0	75	
	A10	31～32	69.0	6.5	Zr-2	118.7	75	
流 路 仕切管	R1	23～16	79.0	2.5	SUS316	61.7	55	
	R2	16～9	52.0	2.0	SUS316	33.4	55	
	R3	9～8	39.0	2.5	SUS316	40.4	75	
	R4	8～7	54.0	27.0	SUS316	186.4	75	
	R5	7～6	(50.51)	(4.81)	A6061	25.5	85	He スクリーン等価剛性管
	R6	6～3	39.0	2.5	A6061	25.6	75	
	R7	3～1	39.0	5.0	A6061	32.2	75	
BOCA	B1	89～86	70.0	8.0	SUS304	138.3	65	
	B2	86～80	69.0	3.35	SUS304	139.4	65	
	B3	80～76	45.0	2.0	SUS304	63.6	65	
	B4	76～73	32.0	2.5	SUS304	52.7	178	
	B5	73～71	32.0	16.0	SUS304	44.8	178	
	B6	89～90	114.3	6.0	SUS304	930.3	65	
	B7	90～91	60.0	30.0	SUS304	239.9	49	
	B8	91～92	(80.0)	(40.0)	SUS304	483.5	35	
	B9	92～93	(80.0)	(40.0)	SUS304	2565.4	35	
	B10	93～94	(80.0)	(40.0)	SUS304	525.6	35	
サポ-ート ア-ーム	S1	61～62	34.0	2.8	SUS304	43.8	49	25ASch10S
	S2	62～63	(34.25)	(14.52)	SUS304	78.8	49	□30
キャプセル 交換機	C1	101～107	150.0	19.0	SUS304	781.6	20	昇降棒
	C2	105～122	(519.3)	(6.6)	SS400	819.8	20	回転ア-ーム *2
	C3	121～127	600.0	20.0	SS400	2805.7	20	支柱

*1 ()内は等価断面

*2 □600-□300

Table 2 飽和温度キャプセルの要素仕様

名 称	記号	節点番号	管形状		材 質	部 材 重 量 w (kg/m)	水 の 付加マス w* (kg/m)	合 計 重 量 w+w* (kg/m)	合 計 重 量 w+w* (N/m)	運 転 温 度 T (°C)	備 考	形状 グ ル ー プ
			外径	肉厚								
IASCCベース-K6 IASCCベース-G6	H1	23~22	34.0	1.5	SUS316L	1.556	1.156	2.712	26.60	55		
	H2	22~8	34.0	1.5	SUS316L	1.556	1.156	2.712	26.60	55		
	C1	8~6	60.0	4.0	SUS316L	7.150	3.600	10.750	105.42	200		I
	C2	6~5	60.0	4.0	SUS316L	7.150	—	7.150	70.12	200	反射体内	
	C3	5~1	60.0	4.0	SUS316L	28.728	—	28.728	281.73	200	*1	
IASCC照射下-O6 IASCC照射下-O11 IASCC照射下-M13 IASCC照射下-L13 IASCC照射下-F13 IASCC照射下-D12	H1	23~22	34.0	1.5	SUS316L	1.556	1.156	2.712	26.60	55		
	H2	22~14	34.0	1.5	SUS316L	1.556	1.156	2.712	26.60	55		
	H3	14~12	68.0	4.0	SUS316L	8.172	4.624	12.796	125.48	55		II
	H4	12~8	34.0	1.5	SUS316L	1.556	1.156	2.712	26.60	55		
	C1	8~6	65.0	2.0	SUS316L	4.022	4.225	8.247	80.87	80		
	C2	6~5	65.0	2.0	SUS316L	33.716	4.225	37.941	372.07	80	反射体外	
	C3	5~1	65.0	2.0	SUS316L	33.716	—	33.716	330.64	80	*1	
	Hf-WCU照射-M6 (M10)	23~22	34.0	1.5	SUS316L	1.556	1.156	2.712	26.60	55		
Hf-He照射-G10	H2	22~8	34.0	1.5	SUS316L	1.556	1.156	2.712	26.60	55		
	C1	8~6	40.0	2.5	SUS316L	2.993	1.600	4.593	45.04	200		III
	C2	6~5	40.0	2.5	SUS316L	2.993	—	2.993	29.35	200	反射体内	
	C3	5~1	40.0	2.5	SUS316L	12.768	—	12.768	125.21	200	*2	
	H1	23~22	25.0	1.5	SUS316L	1.125	0.625	1.750	17.16	55		
大型試験片-GH34	H2	22~7	25.0	1.5	SUS316L	1.125	0.625	1.750	17.16	55		
	C1	7~6	30.0	1.5	SUS316L	1.365	0.900	2.265	22.21	80		IV
	C2	6~3	30.0	1.5	SUS316L	1.365	—	1.365	13.38	80	反射体内	
	C3	3~1	30.0	1.5	SUS316L	7.182	—	7.182	70.43	80	*2	
	H1	23~22	34.0	1.5	SUS316L	1.556	1.156	2.712	26.60	55		
通常キャプセル-F4	H2	22~7	34.0	1.5	SUS316L	1.556	1.156	2.712	26.60	55		
	C1	7~6	110.0	3.5	SUS316L	11.898	12.100	23.998	235.34	80		IV
	C2	6~3	110.0	3.5	SUS316L	11.898	—	11.898	116.68	80	反射体内	
	C3	3~1	110.0	3.5	SUS316L	96.558	—	96.558	946.91	80	*2	
	H1	23~22	34.0	1.5	SUS316L	1.556	1.156	2.712	26.60	55		
V	H2	22~7	34.0	1.5	SUS316L	1.556	1.156	2.712	26.60	55		
	C1	7~6	60.0	2.0	SUS316L	3.703	3.600	7.303	71.62	80		
	C2	6~5	60.0	2.0	SUS316L	3.703	—	3.703	36.31	80	反射体内	
	C3	5~1	60.0	2.0	SUS316L	28.728	—	28.728	281.73	80	*1	

*1 中実(SUS316重量密度相当)

*2 中実(AL合金重量密度)

7980.0 kg/m³

2700.0 kg/m³

Table 3 OSF-1 炉内管の集中重量

計算 ケース	節 点	重 量 (kg) (N)	備 考
BOCA 挿入時	50	1.9 (18.7)	管台 (圧力管上部の重量調整)
	52	9.3 (91.2)	フランジ (圧力管上部の重量調整)
	53	2.6 (25.5)	管台 (圧力管上部の重量調整)
	54	5.5 (54.0)	管台 (圧力管上部の重量調整)
	55	10.5 (103.0)	ロック機構(1部を除く) (圧力管上部の重量調整)
	56	0.6 (5.9)	ロック機構の一部 (圧力管上部の重量調整)
	101	74.0 (725.7)	ロードセル、つかみ装置の一部
	105	623.0 (6109.6)	昇降棒スライド、ボス
	122	1184.0 (11611.1)	回転アーム昇降軸受、 昇降棒駆動装置、ねじ等
	127	704.0 (6903.9)	ホースドラムアーム、ホースリール、 ケーブルリール

Table 4 拘束、結合条件

O S F - 1 炉 内 管									
項 目	節 点		拘束および結合条件						備 考
			X	Y	Z	X 回 転	Y 回 転	Z 回 転	
拘束条件 (○：拘束)	34	-	○	○					圧力管グリッド位置
	35	-	○	○					圧力管グリッド位置
	48	-	○	○	○			○	圧力管炉容器上部取付位置
	63	-	○	○	○	○	○	○	サポートアーム炉容器側固定点
	121	-	○	○	○	○	○	○	キャプセル交換機固定点
結合条件 (○：剛結合) (●：ばね結合) (ここに示す以外の 節点は全て剛結合)	2	33	●	●					圧力管－流路仕切管
	11	36	●	●					圧力管－流路仕切管
	13	38	●	●					圧力管－流路仕切管
	18	42	●	●					圧力管－流路仕切管
	19	44	●	●					圧力管－流路仕切管
	23	51	○	○	○	○	○	○	圧力管－流路仕切管
	5	72	●	●					流路仕切管－キャプセル
	14	79	●	●					流路仕切管－キャプセル
	20	84	●	●					流路仕切管－キャプセル
	43	61	○	○					圧力管－サポートアーム
	55	87	○	○					圧力管－キャプセル
	94	101	○	○	○			○	キャプセル－キャプセル交換機

飽和温度キャプセル							
節 点	拘束条件						備 考
	X	Y	Z	X 回 転	Y 回 転	Z 回 転	
1			○				圧力管炉容器上部取付位置
2	○	○					サポート(軸直角方向拘束)
4	○	○					パッド
18	○	○					パッド
22	○	○	○	○	○	○	キャプセル下端

○：拘束

Table 5 OSF-1 冷却水配管反力

荷重条件	接続 配管	反力 (N)			モーメント (N・m)		
		FY	FZ	MX	MY	MZ	FX
自 重	A	-7.9	6.9	-83.4	15.7	-22.6	-4.0
	B	-9.9	5.9	-101.1	11.8	-16.7	-3.0
熱膨張	A	57.9	3.0	9.9	-3.0	-5.9	5.0
	B	67.7	-3.0	3.0	-3.0	-5.9	5.0
地 震	A	141.3	127.5	36.3	23.6	36.3	47.1
	B	60.9	51.0	47.1	9.9	15.7	21.6

A : 節点 58, 冷却水入口管

B : 節点 57, 冷却水出口管)

Table 6 飽和温度キャプセルの計算モデル寸法

名 称	EL 寸法											(mm)					曲げ寸法 °、mm				形状 グループ	備 考
	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	b8	a9	b9	a10	b10	a11	b11	θ1	R1	θ2	R2			
IASCCベース-K6	200	850	863	1445	2200	-	-	3932	781	4570	892	6188	1138	6500	1187	155.7	140	164.7	140	I		
	200	850	863	1445	2200	-	-	3953	734	4570	832	6186	1087	6521	1140	157.3	140	166.3	140	I		
IASCC照射下-O6	170	850	1129	1419	2200	2472	3703	4021	542	4570	629	6190	885	6589	948	163.4	140	172.4	140	II		
IASCC照射下-O11	170	850	1129	1419	2200	2473	3711	4031	508	4570	593	6187	849	6599	914	164.5	140	173.5	140	II		
IASCC照射下-M13	170	850	1129	1419	2200	2473	3708	4027	521	4570	607	6186	861	6595	926	164.1	140	173.1	140	II		
IASCC照射下-L13	170	850	1129	1419	2200	2471	3698	4015	537	4570	631	6188	905	6583	968	162.8	140	171.8	140	II		
IASCC照射下-F13	170	850	1129	1419	2200	2473	3708	4027	523	4570	609	6187	864	6595	929	164	140	173	140	II		
IASCC照射下-D12	170	850	1129	1419	2200	2475	3721	4042	466	4570	472	6352	493	6792	498	165.8	140	166.5	140	II		
Hf-WCU照射-M6	170	850	863	1419	2200	-	-	3977	671	4570	765	6191	1021	6546	1077	159.3	140	168.3	140	III		
(M10)	170	850	863	1419	2200	-	-	3977	671	4570	765	6188	1021	6545	1078	159.3	140	168.3	140	III		
Hf-He照射-G10	170	850	680	930	2200	-	-	3940	762	4570	862	6175	1115	6509	1168	156.3	140	165.3	140	IV		
大型試験片-GH34	170	850	680	930	1820	-	-	3003	434	4570	682	6171	935	6578	999	159.8	140	168.8	140	IV		
通常キャプセル-F4	200	850	863	930	2200	-	-	3016	396	4570	641	6169	894	6592	961	161.7	140	170.7	140	V	小型試験片	

* レジューサ長さは下図に示すとおりであり、節点は中央にとる。

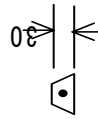


Table 7 OSF-1 炉内管の荷重の組合せと許容応力状態

許容応力状態	設計条件	I _A	III _{AS}
運転状態	最高使用温度 最高使用圧力	I, II, III, IV, 試験	I, II, III, IV, S ₁
繰返し回数 (回)	——	10539	1(等価応力サイクル 200)
圧 力	1.76MPa (圧力管) 0.29MPa (流路仕切管)	1.936MPa (圧力管) 0.29MPa (流路仕切管)	1.936MPa (圧力管) 0.29MPa (流路仕切管)
温 度	90℃ (圧力管) 90,95℃(流路仕切管*1)	90℃ (圧力管) 90,95℃(流路仕切管*1)	90℃ (圧力管) 90,95℃(流路仕切管*1)

*1 ガススクリーン部のみ 95℃

Table 8 ガスクリーンの荷重の組合せと許容応力状態

許容応力状態		設計条件	I _A	III _{AS}
運転状態		最高使用温度 最高使用圧力	I, II	I, II, S ₁
繰返し回数 (回)		—	10539	1(等価応力サイクル 200)
圧 力	A	4.41MPa	3.92MPa⇔-0.10MPa	3.92MPa
	B	0 MPa	0.29 MPa	0.29 MPa
	C	0 MPa	0.29 MPa	0.29 MPa
温 度		95℃	試料発熱 100%⇔0%	運転温度

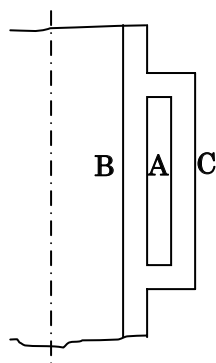


Table 9 飽和温度キャプセルの温度及び圧力条件

名 称	最高使用温度 (℃)	最高使用圧力 (MPa)	運転温度(℃)		運転圧力 (MPa)	形状 グループ	備考
			キャプセル	保護管			
IASCC ベース - K6	200.0	10.0	200.0	55.0	10	I	
IASCC ベース - G6	200.0	10.0	200.0	55.0	10	I	
IASCC 照射下- O6	80.0	1.76(外圧)	80.0	55.0	1.76(外圧)	II	
IASCC 照射下- O11	80.0	1.76(外圧)	80.0	55.0	1.76(外圧)	II	
IASCC 照射下- M13	80.0	1.76(外圧)	80.0	55.0	1.76(外圧)	II	
IASCC 照射下- L13	80.0	1.76(外圧)	80.0	55.0	1.76(外圧)	II	
IASCC 照射下-F13	80.0	1.76(外圧)	80.0	55.0	1.76(外圧)	II	
IASCC 照射下- D12	80.0	1.76(外圧)	80.0	55.0	1.76(外圧)	II	
Hf-He 照 射- M6	200.0	10.0	200.0	55.0	10	III	
(M10)	200.0	10.0	200.0	55.0	10	III	
Hf-He 照 射- G10	80.0	1.76(外圧)	80.0	55.0	1.76(外圧)	IV	
大型試験片 -GH34	80.0	1.76(外圧)	80.0	55.0	1.76(外圧)	IV	
通常キャプセル-F4	80.0	1.76(外圧)	80.0	55.0	1.76(外圧)	V	小型試験片

Table 1 0 適用応力評価基準の評価項目と許容応力
【第3種管】

評価基準	試験研究炉第3種管（耐震クラス：A）	
応力分類 許容 応力状態	1 次 応 力	1 次 + 2 次 応 力
設計条件	$\frac{PD}{200t} \leq S$ $\frac{B_1PD_o}{2t} + \frac{B_2Ma}{Z} \leq 1.5S$ $\frac{B_1PmD_o}{2t} + \frac{B_2(Ma+Mb)}{Z} \leq 1.8S$	—————
I A	—————	$S_n = \frac{PD_o}{4t} + \frac{0.75i_1Ma + i_2Mc}{Z} \leq Sa$ $Sa = 1.25fSc + (1 + 0.25f)Sh$
II A	—————	$S_n = \frac{PD_o}{4t} + \frac{0.75i_1(Ma+Mb) + i_2Mc}{Z} \leq Sa$ $Sa = 1.25fSc + (1.2 + 0.25f)Sh$
III AS	$\frac{PmD}{200t} \leq 1.2S$ $\frac{PD_o}{4t} + \frac{0.75i_1(Ma+Mb)}{Z} \leq Sy$	$\frac{0.75i_1Mb^*}{Z} \leq 2Sy$ <p>上式を満足しない場合は、疲れ解析を行う</p>

注. 記号

P : 最高使用圧力

Pm : 運転圧力

D, D_o : 外径

t : 肉厚

Z : 断面係数

B_1, B_2 : 応力係数

i_1, i_2 : 応力係数

f : 許容応力低減係数

S : 1次応力

Sa : 1次+2次の許容応力

Sc : 室温における許容引張応力

Sh : 使用温度における許容引張応力

Sy : 設計降伏点

Ma : 自重によるモーメント

Mb : 地震によるモーメント

Mb^* : 地震によるモーメントの全振幅

Mc : 熱膨張によるモーメント

Table 1 1 適用応力評価基準の評価項目と許容応力
【第4種管】

評価基準	試験研究炉第4種管（耐震クラス：A）	
<div> <div>応力分類</div> <div>許容応力状態</div> </div>	1 次 応 力	1 次 + 2 次 応 力
設計条件	$\frac{PD}{200t} \leq S$	_____
I A	_____	_____
II A	_____	_____
III AS	$\frac{PmD}{200t} \leq 1.2S$ $\frac{PD_o}{4t} + \frac{0.75i_1(Ma + Mb)}{Z} \leq Sy$	$\frac{0.75i_1Mb^*}{Z} \leq 2Sy$ 上式を満足しない場合は、疲れ解析を行う

Table 1 2 適用応力評価基準の評価項目と許容応力
【第 3 種管 解析による設計】

評価基準	試験研究炉第 3 種管（解析による設計）（耐震クラス：A）			
<div> <div>応力分類</div> <div>許容応力状態</div> </div>	1 次一般 膜応力	1 次膜＋ 曲げ応力	1 次＋ 2 次応力	1 次＋ 2 次＋ ピーク応力
設計条件	$P_m \leq S$	$P_L + P_b \leq 1.5S$	—————	—————
I A	—————	—————	$S_n \leq 3S_m$	$S_p \Rightarrow 3S_\ell$
II A	—————	—————		$U_i = n_i / N_i$
III AS	$P_m \leq 1.5S$	$P_L + P_b \leq 2.25S^{*1}$	$S_n \leq 3S_m^{*2}$	$S_p \Rightarrow 3S_\ell$ $U_i = n_i / N_i^{*3}$

*1 ただし、ねじりによる応力が $0.55S$ を超える場合は、曲げとねじりによる応力について $1.8S$ とする。

*2 地震動のみによる応力振幅について評価する。

*3 運転状態 I、II における疲れ累積係数との和が 1.0 以下であること。

*4 記号

P_m : 1 次一般膜応力

S_ℓ : 繰返しピーク応力強さ

$P_L + P_b$: 1 次膜＋曲げ応力

U_i : 疲れ累積係数（ ≤ 1.0 ）

S_n : 1 次＋ 2 次応力

n_i : 実際の繰返し回数

S_p : 1 次＋ 2 次応力＋ピーク応力

N_i : 許容繰返し回数

S_m : 設計応力強さ

S_p : 設計降伏点

S : 許容引張応力

Table 1 3 適用応力評価基準の評価項目と許容応力
【第 3 種容器 解析による設計】

評価基準	試験研究炉第 3 種容器（解析による設計）（耐震クラス：A）			
応力分類 許容 応力状態	1 次一般 膜応力*1	1 次膜＋ 曲げ応力	1 次＋2 次応力	1 次＋2 次＋ ピーク応力
設計条件		$P_L \leq 1.5S$ $P_L + P_b \leq 1.5S$	—————	—————
I A	—————	—————	$P_L + P_b + \sigma \leq 3S_m$	$P_L + P_b + \sigma \Rightarrow S_\ell$ $U_i = n_i / N_i$
II A	—————	—————		
III AS	$P_m \leq$ ($S_y, 0.6S_u$ の うち小さい方)	$P_L + P_b \leq$ $1.5S_y, 0.6S_u$ の うち小さい方	$P_L + P_b + \sigma \leq 2S_y$ *2	$P_L + P_b + \sigma + F \Rightarrow S_\ell$ $U_i = n_i / N_i$ *3

*1 強度計算を実施するため、ここでは評価しない。

*2 地震動のみによる応力振幅について評価する。

*3 運転状態 I、II における疲れ累積係数との和が 1.0 以下であること。

*4 記号

P_m : 1 次一般膜応力

P_L : 1 次膜応力

P_b : 1 次曲げ応力

σ : 2 次応力

F : ピーク応力

S_m : 設計応力強さ

S : 許容引張応力

S_y : 設計降伏点

S_ℓ : 繰返しピーク応力強さ

U_i : 疲れ累積係数 (≤ 1.0)

n_i : 実際の繰返し回数

N_i : 許容繰返し回数

Table 1 4 OSF-1 炉内管の応力評価結果

評価点	許容応力 状態	一 次 及 び 二 次 応 力 (N/mm ²)				一次応力評価 (N/mm ²)		一次+二次応力評価 (N/mm ²)	
		内圧応力 ① (SPm)	自重応力 ②	短期的機械 荷重応力及び 地震応力 ③	二次応力 * ④	計算応力 ①+②	許容応力 1.5・S Sy**	計算応力 ①+②+④ Ss (S ₁)	許容応力 Sa (ハ) 2.0・Sy
47	(I _A , II _A)	8	1	-	-	9	105	-	-
	(I _A , II _A)	8	1	-	1	-	-	10	207
	(I _A , II _A)	9	1	0	-	10	126	-	-
	III _A S	9	1	0	1	-	-	11	221
	III _A S	9	1	62	-	72	173	-	-
40	(I _A , II _A)	-	-	124	0	-	-	124	346
	(I _A , II _A)	9	1	-	-	10	105	-	-
	(I _A , II _A)	9	1	-	1	-	-	11	207
	(I _A , II _A)	10	1	0	-	11	126	-	-
	III _A S	10	1	0	1	-	-	12	221
35	(I _A , II _A)	10	1	41	-	52	173	-	-
	(I _A , II _A)	-	-	82	0	-	-	82	346
	(I _A , II _A)	4	1	-	-	5	105	-	-
	(I _A , II _A)	4	1	-	2	-	-	7	207
	(I _A , II _A)	4	1	0	-	5	126	-	-
20	(I _A , II _A)	4	1	0	2	-	-	7	221
	III _A S	4	1	56	-	61	173	-	-
	III _A S	-	-	112	0	-	-	112	346
	(I _A , II _A)	3	3	-	-	6	193	-	-
	(I _A , II _A)	3	3	-	1	-	-	7	322
16	(I _A , II _A)	3	3	0	-	6	232	-	-
	(I _A , II _A)	3	3	0	1	-	-	7	348
	III _A S	3	3	99	-	105	180	-	-
	III _A S	-	-	198	0	-	-	198	360
	(I _A , II _A)	2	1	-	-	3	193	-	-
9	(I _A , II _A)	2	1	-	2	-	-	5	322
	(I _A , II _A)	2	1	0	-	3	232	-	-
	(I _A , II _A)	2	1	0	2	-	-	5	348
	III _A S	2	1	58	-	61	180	-	-
	III _A S	-	-	116	0	-	-	116	360
9	(I _A , II _A)	2	1	-	-	3	193	-	-
	(I _A , II _A)	2	1	-	1	-	-	4	322
	(I _A , II _A)	2	1	0	-	3	232	-	-
	(I _A , II _A)	2	1	0	1	-	-	4	348
	III _A S	2	1	43	-	46	180	-	-
9	III _A S	-	-	86	0	-	-	86	360

* (I_A , II_A) は熱による支持点変位及び熱膨張応力、III_AS は地震相対変位による応力を記す。

** オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については Sy と 1.2S のうち大きい方の値とする。

Table 1 5 OSF-1 炉内管の解析による応力評価結果

節点番号	配管要素名称	許容応力 状態	一 次 応 力 評 価 (N/mm ²)						一 次 + 二 次 応 力 評 価 (N/mm ²)				疲労 評価	
			一次応力 (P/Pb) S1	許容応力 1.5・S 2.25・S	振り応力 St(S1)	許容応力 0.55・S	曲げと振 り 応力 (St+Sb) S1	許容応力 1.8・S	一次+二次応力 Sn	地震による 一次+二次応力 Ss(S1)	熱膨張応力 Se	熱を除いた 一次+二次応力 Sc	許容応力 3.0・Sm 3.0・Sm	疲れ累積係数 U U+US1
47	ST. PIPE	(I A, II A) III A S	9.6 70.9	105.0 157.0	0.0	39.0	25.9	126.0	17.6	122.5	---	---	280.0 280.0	0.0000 0.0011
40	REDUCER	(I A, II A) III A S	9.7 50.6	105.0 157.0	0.0	39.0	12.7	126.0	28.6	190.3	---	---	280.0 280.0	0.0000 0.0065
35	ST. PIPE	(I A, II A) III A S	4.5 60.2	105.0 157.0	0.0	39.0	16.8	126.0	9.1	111.4	---	---	280.0 280.0	0.0000 0.0005
20	ST. PIPE	(I A, II A) III A S	5.0 103.2	193.0 290.0	0.0	70.0	22.0	232.0	5.0	196.4	---	---	411.0 411.0	0.0000 0.0000
16	REDUCER	(I A, II A) III A S	2.1 60.2	193.0 290.0	0.0	70.0	19.9	232.0	8.4	270.5	---	---	411.0 411.0	0.0000 0.0001
9	REDUCER	(I A, II A) III A S	1.7 44.8	193.0 290.0	0.0	70.0	10.3	232.0	5.4	203.4	---	---	411.0 411.0	0.0000 0.0000

*1 *印がある場合は振りによる応力が許容応力を超えていることを示す。

*2 *印がある場合は一次+二次応力が許容応力を超えていることを示し、Se、Scの応力評価結果を示す。

Table 1 6 OSF-1 炉内管の固有振動数および応答加速度

振動次数 (次)	固有振動数 (Hz)	応答加速度 (gal)		節点の加速度最大値 (gal)	
		X 方向地震	Y 方向地震	X 方向地震	Y 方向地震
1	4.10	2105	2105	2683 (節点 76)	3784 (節点 76)
2	4.46	1992	1992		
3	7.03	994	994		
4	10.18	821	821		
5	11.07	827	827		
6	11.18	827	827		
7	11.44	848	848		
8	14.13	2415	2415		
9	16.04	2415	2415		
10	17.58	1361	1361		
11	17.59	1346	1346		
12	19.11	898	898		
13	20.99	551	551		

Table 1 7 発生応力におけるモーメント成分(一例)

評価点	荷 重	モーメント成分 (N・m)			備 考
		Mx	My	Mz	
d (20)	自重	0	0	0	
	熱膨張（配管反力を含む）	0	0	1	
	地震（静的震度 X 方向）（水平 1）	0	1	-1	
	地震（静的震度 Y 方向）（水平 2）	0	1	3	
	地震（静的震度 Z 方向）（鉛直）	0	28	11	
	地震（動的解析 X 方向）（水平 1）	0	-2	4	
	地震（動的解析 Y 方向）（水平 2）	0	206	1	
	地震（配管反力）（Fx,My,Mz）	0	1	206	
	地震（配管反力）（Fy,Fz,Mx）	0	10	4	
e (16)	自重	0	0	0	
	熱膨張（配管反力を含む）	0	2	1	
	地震（静的震度 X 方向）（水平 1）	0	1	1	
	地震（静的震度 Y 方向）（水平 2）	0	2	-4	
	地震（静的震度 Z 方向）（鉛直）	0	-73	-5	
	地震（動的解析 X 方向）（水平 1）	0	-5	-65	
	地震（動的解析 Y 方向）（水平 2）	0	0	0	
	地震（配管反力）（Fx,My,Mz）	0	180	121	
	地震（配管反力）（Fy,Fz,Mx）	0	121	139	
f (9)	自重	0	-1	-1	
	熱膨張（配管反力を含む）	0	-1	2	
	地震（静的震度 X 方向）（水平 1）	0	22	3	
	地震（静的震度 Y 方向）（水平 2）	0	3	18	
	地震（静的震度 Z 方向）（鉛直）	0	-1	0	
	地震（動的解析 X 方向）（水平 1）	0	90	52	
	地震（動的解析 Y 方向）（水平 2）	0	52	44	
	地震（配管反力）（Fx,My,Mz）	0	0	0	
	地震（配管反力）（Fy,Fz,Mx）	0	-1	-1	

注. Mx,My,Mz は部材座標

(Mx : 管軸方向、My : 管軸直角方向 1、Mz : 管軸直角方向 2)

Table 1 8 ガスクリーンの応力評価結果

(単位：MPa)

評価断面	1 次 応 力 (設計条件)				1 次 + 2 次応力 (I _A 、 II _A)				1 次 + 2 次 + ピーク応力 (I _A 、 II _A)				許容回数	U _i =m _i /N _i
	$P L \leq 1.5 S$		内 外 面	$P L + P b \leq 1.5 S$		$P L + P b + \sigma \leq 3 S m$		$P L + P b + \sigma + F$	S ₀					
	$P L$	$1.5 S$		$P L + P b$	$1.5 S$	$P L + P b + \sigma$	$3 S m$							
1	2	94	内	3	94	15	261	19	10	10 ⁶	0.011			
			外	2	94	12	261	17	9	10 ⁶	0.011			
2	13	94	内*1	40	94	37	261	185	93	2.0×10 ⁴	0.527			
			外	17	94	13	261	10	5	10 ⁶	0.011			
3	19	94	内	21	94	23	261	23	12	10 ⁶	0.011			
			外*1	18	94	17	261	85	43	10 ⁶	0.011			
4	46	94	内	47	94	44	261	44	22	10 ⁶	0.011			
			外	44	94	40	261	41	21	10 ⁶	0.011			
5	10	94	内*1	28	94	28	261	140	70	8.0×10 ⁴	0.132			
			外	14	94	12	261	9	5	10 ⁶	0.011			
6	24	94	内	31	94	28	261	33	17	10 ⁶	0.011			
			外*1	29	94	26	261	130	65	1.4×10 ⁵	0.076			

*1 局所的な構造不連続部のため、疲れ強度減少係数を5とする。
材料(A6061)の各温度における許容引張応力及び設計応力強さは以下のとおり。

S = 63 (95°C)
S_m = 87 (95°C)

Table 1 9 ガススクリンの解析による応力評価結果

(単位 : MPa)

評価断面	1 次 応 力 (Ⅲ _A S)				1 次 + 2 次応力 (Ⅲ _A S)			1 次 + 2 次 + ピーク応力 (Ⅲ _A S)				疲れ累積係数 $U_i = \sum ni / Ni$
	$Pm \leq (Sy, 0.6 Su)_{\min}$		内 外 面	$P L + P b \leq 1.5 (Sy, 0.6 Su)_{\min}$	$P L + P b + \sigma \leq 2Sy$		$P L + P b + \sigma + F$	S _e	許容回数	$U_i = ni / Ni$		
	Pm	$(Sy, 0.6 Su)_{\min}$			$P L + P b$	$2Sy$						
1	2	61	内	92	24	123	27	14	10 ⁶	0.001	0.012	
			外	92	4	123	4	2	10 ⁶	0.001	0.012	
2	13	61	内*1	92	32	123	160	80	4.0×10 ⁴	0.005	0.532	
			外	92	20	123	22	11	10 ⁶	0.001	0.012	
3	19	147	内	220	22	446	22	11	10 ⁶	0.001	0.012	
			外*1	220	41	446	205	103	3.0×10 ⁴	0.007	0.018	
4	46	147	内	220	24	446	26	13	10 ⁶	0.001	0.012	
			外	220	42	446	45	23	10 ⁶	0.001	0.012	
5	10	61	内*1	92	35	123	175	88	2.5×10 ⁴	0.008	0.140	
			外	92	19	123	22	11	10 ⁶	0.001	0.012	
6	24	61	内	92	35	123	35	18	10 ⁶	0.001	0.012	
			外*1	92	30	123	150	75	6.0×10 ⁴	0.004	0.080	

*1 局所的な構造不連続部のため、疲れ強度減少係数を 5 とする。
 材料 (A6061) の各温度における許容引張応力及び設計応力強さは以下のとおり。
 $S = 63 (95^{\circ}\text{C})$
 $S_m = 87 (95^{\circ}\text{C})$

Table 2 0 飽和温度キャプセルの応力評価結果(Hf-He 照射-G10 一例)

評価点	許容応力状態	一 次 及 び 二 次 応 力 (N/mm ²)				一次応力評価 (N/mm ²)		一次+二次応力評価 (N/mm ²)	
		内圧応力	自重応力	短期的機械荷重応力及び地震応力	二次応力 *	計算応力	許容応力	計算応力	許容応力
		① SP (SPm)	② SMa	③ SMb	④ SMc	①+② ①+②+③	1.5・S 1.8・S Sy**	①+②+④ ①+②+③+④ Ss (S ₁)	Sa (ハ) Sa (-) 2.0・Sy
4	(I A , II A)	10	0	-	-	10	162	-	-
		10	0	-	36	-	-	46	273
	(I A , II A)	10	0	0	-	10	194	-	-
		10	0	0	36	-	-	46	295
	IIIAS	10	0	67	-	77	151	-	-
		-	-	134	0	-	-	134	303
7	(I A , II A)	8	0	-	-	8	162	-	-
		8	0	-	48	-	-	56	273
	(I A , II A)	8	0	0	-	8	194	-	-
		8	0	0	48	-	-	56	295
	IIIAS	8	0	90	-	98	151	-	-
		-	-	180	0	-	-	180	303
10	(I A , II A)	8	3	-	-	11	162	-	-
		8	3	-	45	-	-	56	273
	(I A , II A)	8	3	0	-	11	194	-	-
		8	3	0	45	-	-	56	295
	IIIAS	8	3	34	-	45	151	-	-
		-	-	68	0	-	-	68	303
11	(I A , II A)	8	3	-	-	11	162	-	-
		8	3	-	46	-	-	57	273
	(I A , II A)	8	3	0	-	11	194	-	-
		8	3	0	46	-	-	57	295
	IIIAS	8	3	37	-	48	151	-	-
		-	-	74	0	-	-	74	303
15	(I A , II A)	8	1	-	-	9	162	-	-
		8	1	-	24	-	-	33	273
	(I A , II A)	8	1	0	-	9	194	-	-
		8	1	0	24	-	-	33	295
	IIIAS	8	1	15	-	24	151	-	-
		-	-	30	0	-	-	30	303
16	(I A , II A)	8	0	-	-	8	162	-	-
		8	0	-	25	-	-	33	273
	(I A , II A)	8	0	0	-	8	194	-	-
		8	0	0	25	-	-	33	295
	IIIAS	8	0	15	-	23	151	-	-
		-	-	30	0	-	-	30	303
18	(I A , II A)	8	4	-	-	12	162	-	-
		8	4	-	5	-	-	17	273
	(I A , II A)	8	4	0	-	12	194	-	-
		8	4	0	5	-	-	17	295
	IIIAS	8	4	57	-	69	151	-	-
		-	-	114	0	-	-	114	303
22	(I A , II A)	8	1	-	-	9	162	-	-
		8	1	-	2	-	-	11	273
	(I A , II A)	8	1	0	-	9	194	-	-
		8	1	0	2	-	-	11	295
	IIIAS	8	1	33	-	42	151	-	-
		-	-	66	0	-	-	66	303

* (I_A , II_A) は熱による支持点変位及び熱膨張応力、III_ASは地震相対変位による応力を記す。

** オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については Sy と 1.2S のうち大きい方の値とする。

Table 2 1 飽和温度キャプセルの固有振動数および応答加速度
(Hf-He 照射-G10 一例)

振動次数 (次)	固有振動数 (Hz)	応答加速度 (gal)		節点の加速度最大値 (gal)	
		X 方向地震	Y 方向地震	X 方向地震	Y 方向地震
1	5.53	2658	2658	877 (節点 13)	326 (節点 12)
2	7.91	760	760		
3	12.98	2350	2350		

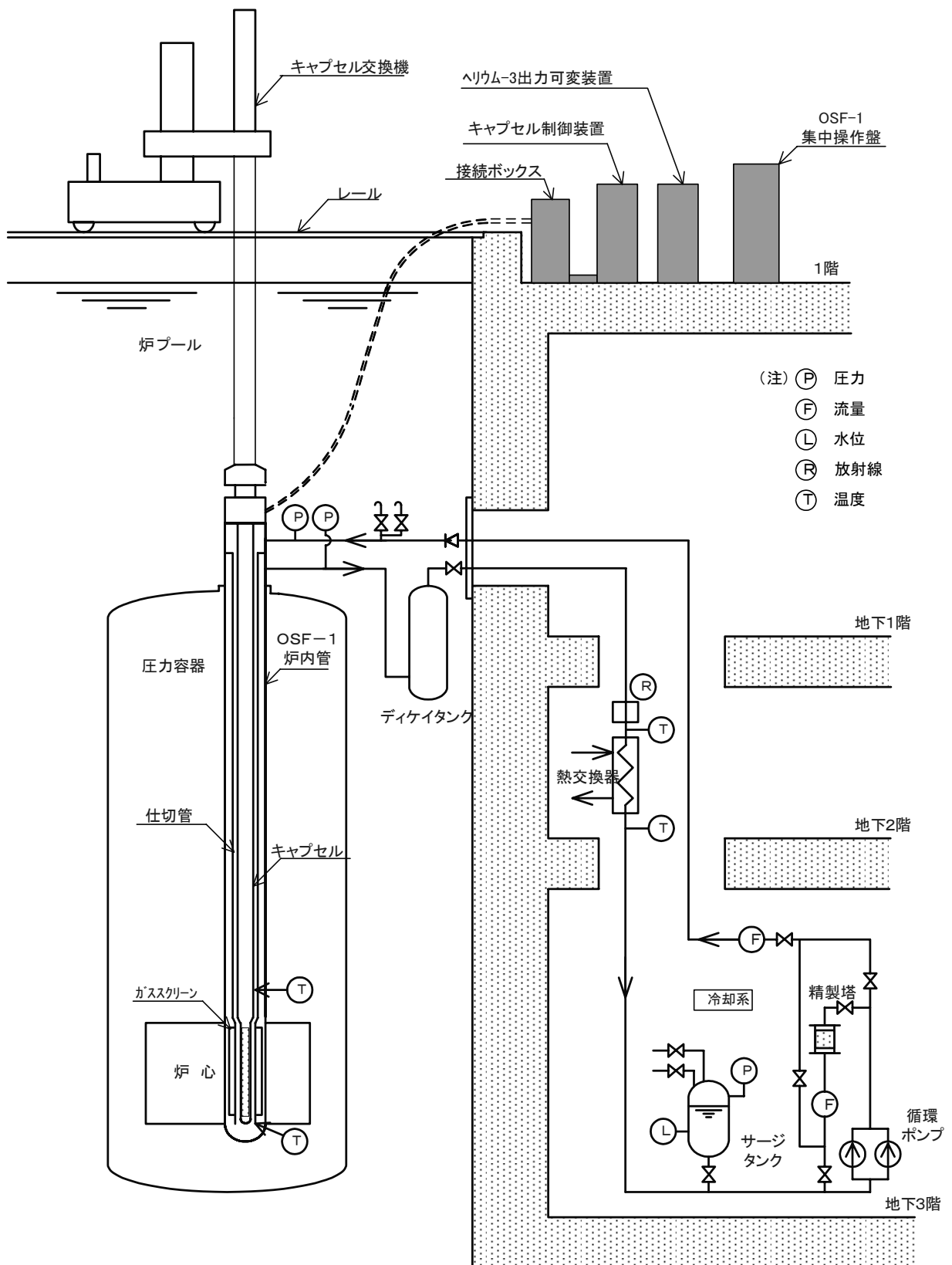


Fig. 1 OSF-1 と BOCA 照射装置の概略構成図

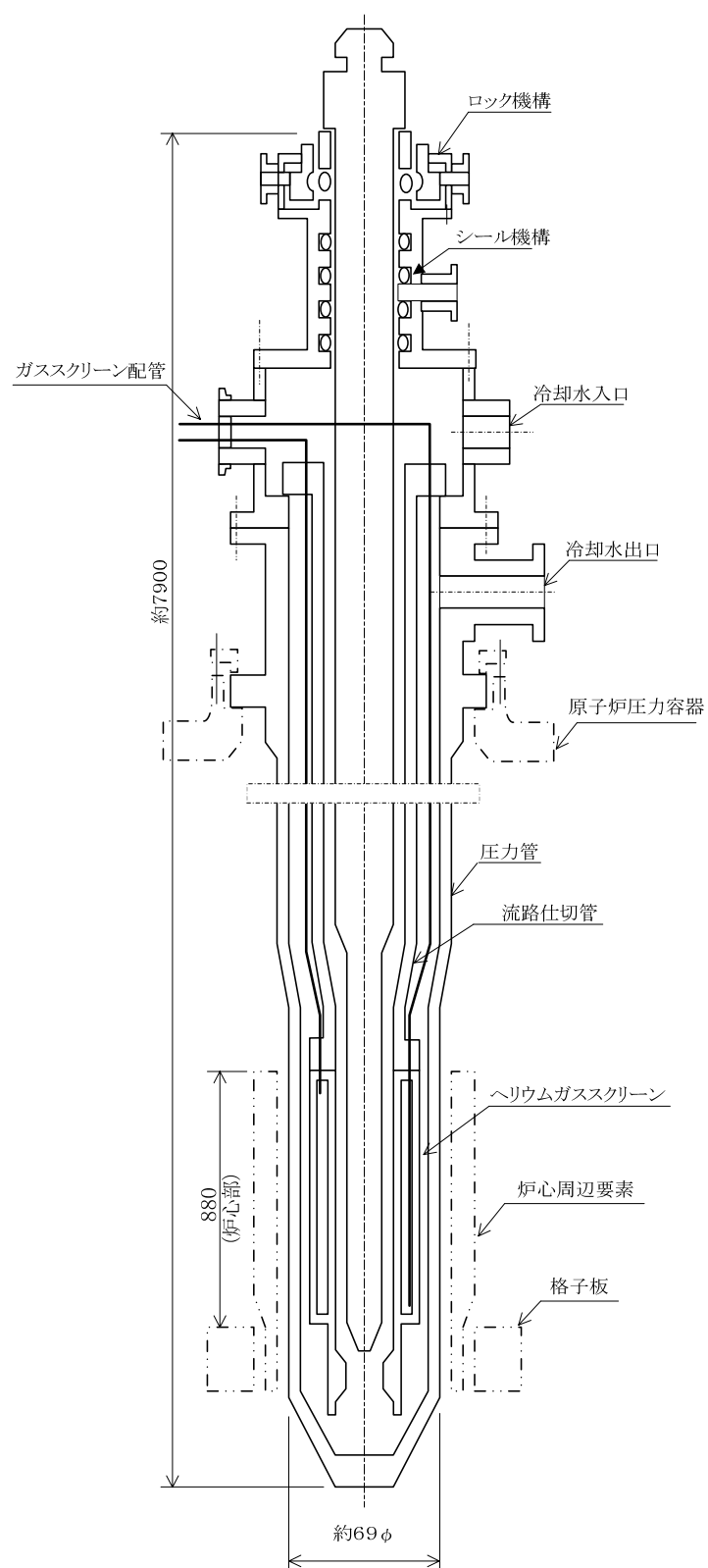


Fig. 2 OSF-1 炉内管の概略構造図

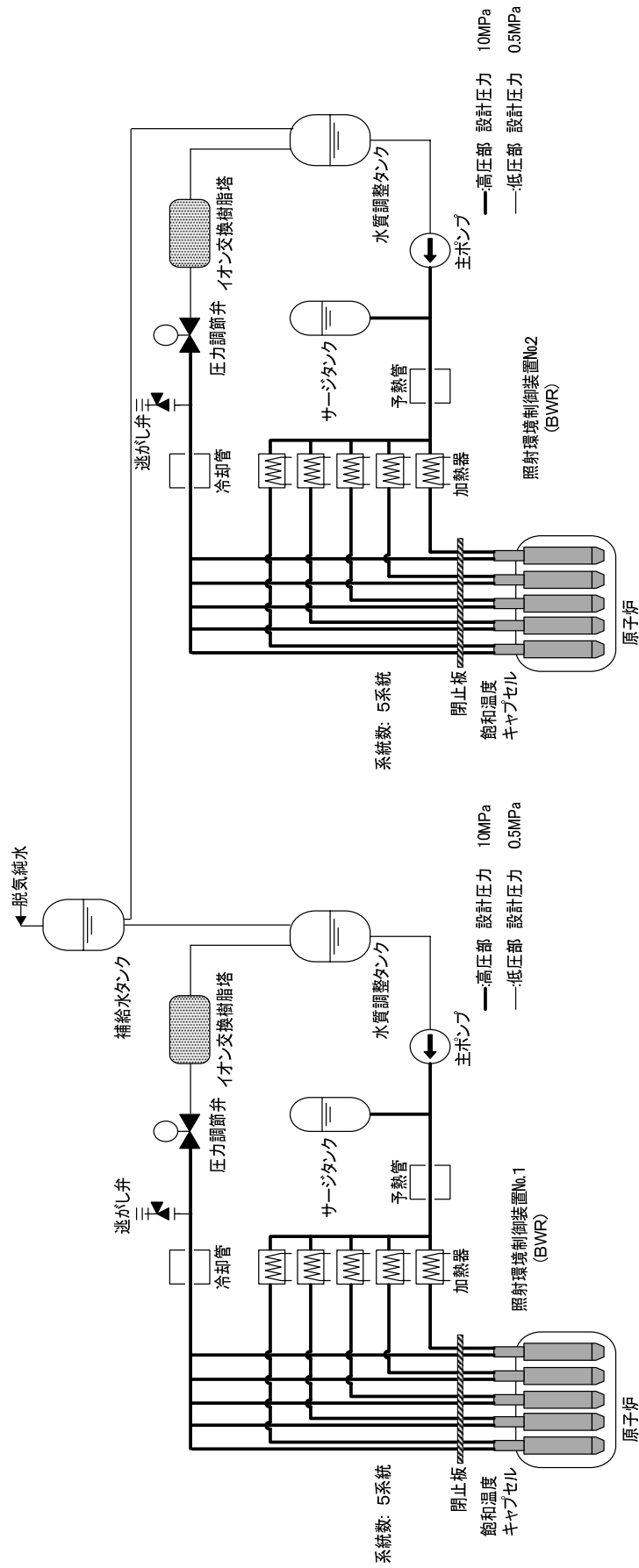


Fig. 3 飽和温度キャプセルと照射環境制御装置の概略構成図

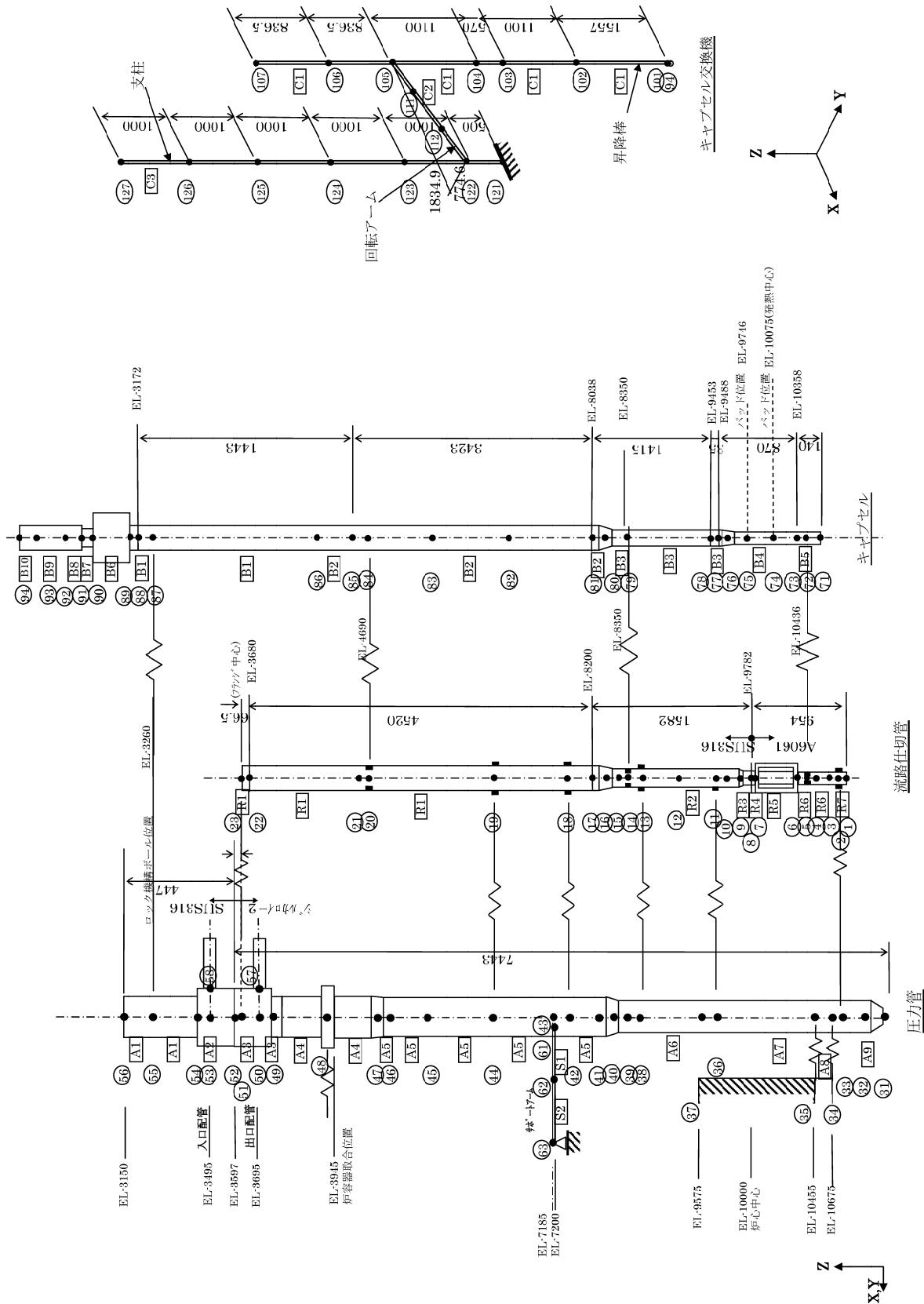


Fig. 4 OSF-1 の計算モデル図

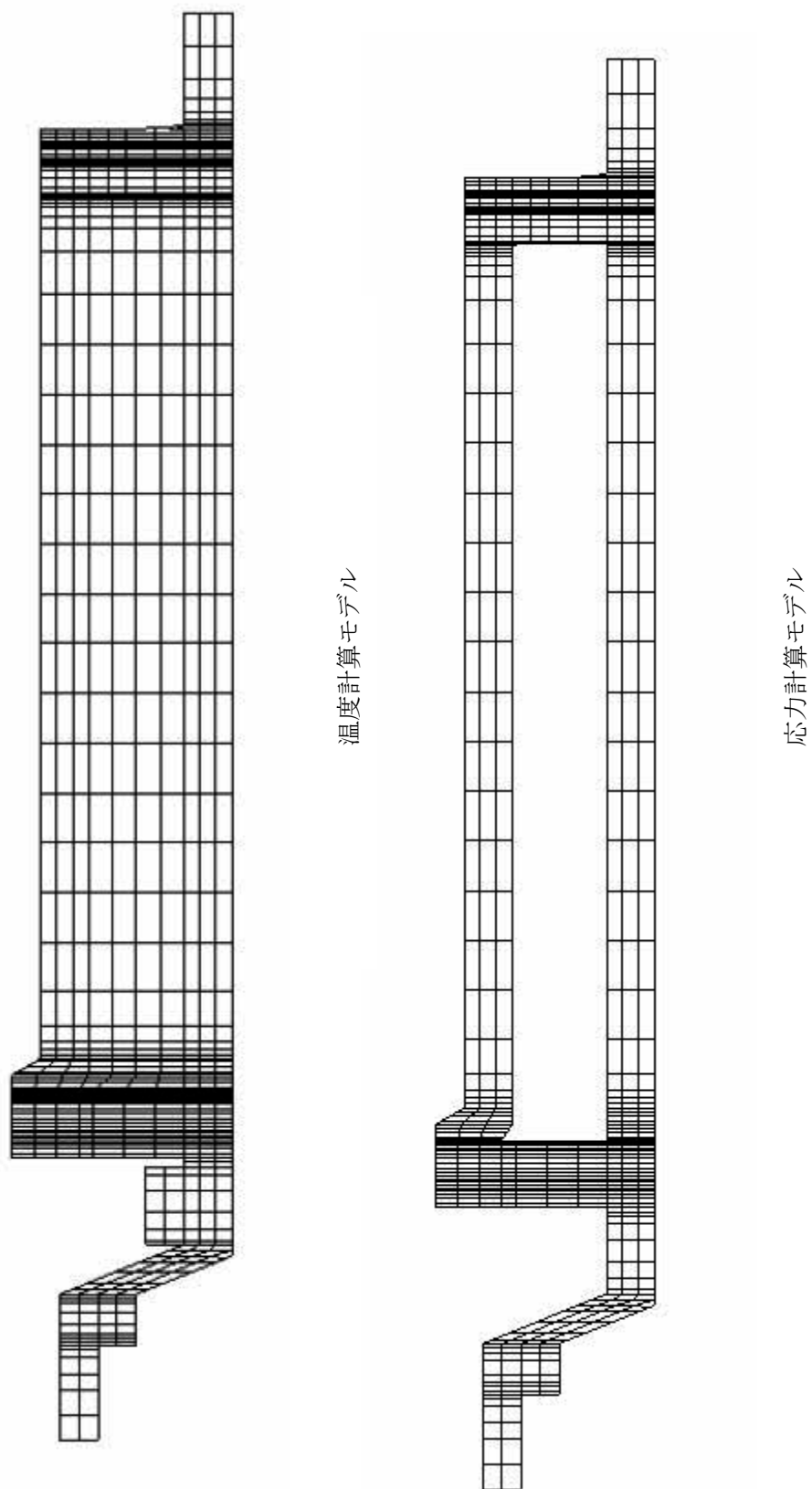


Fig. 5 ガススクリーンの計算モデル図

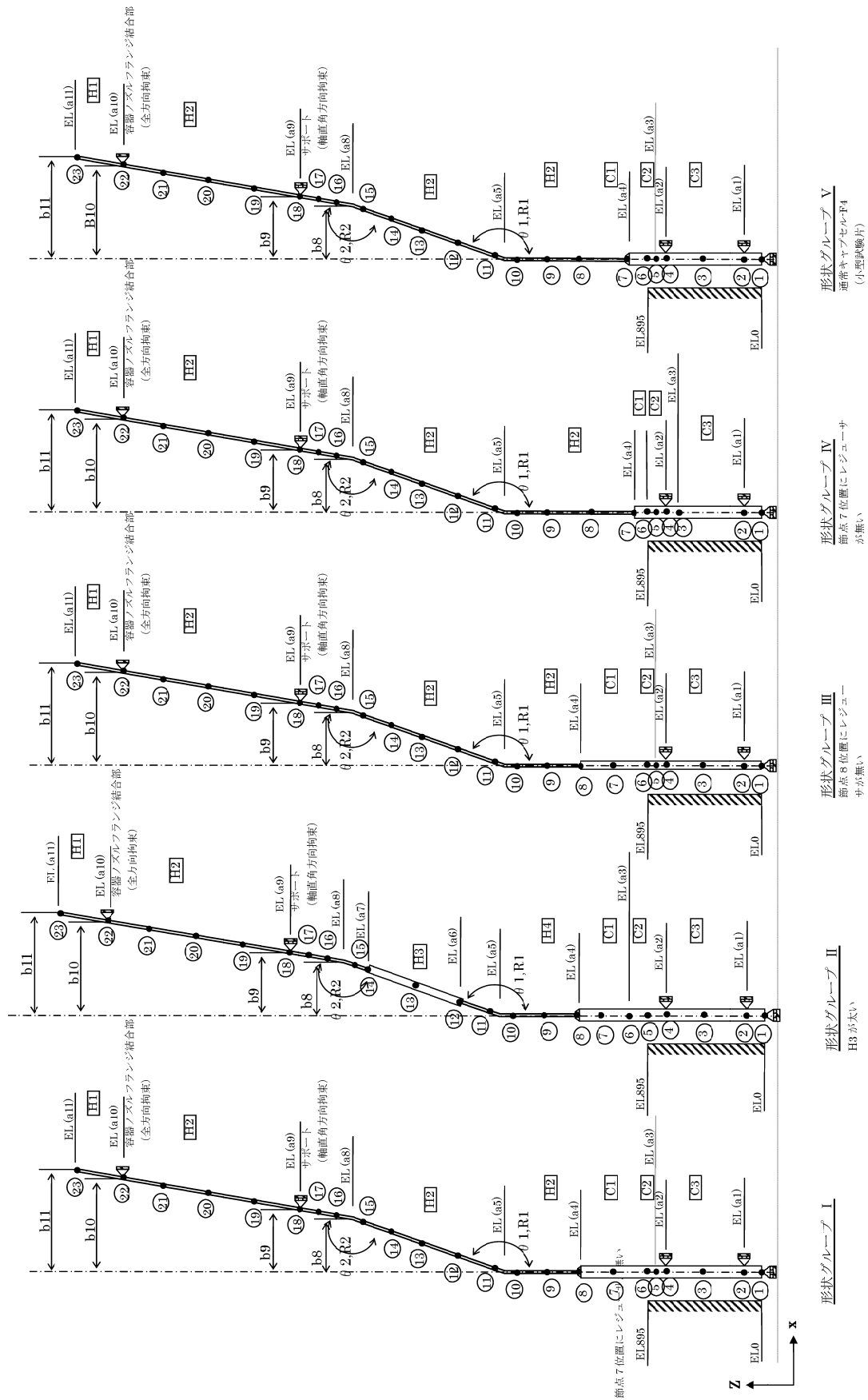
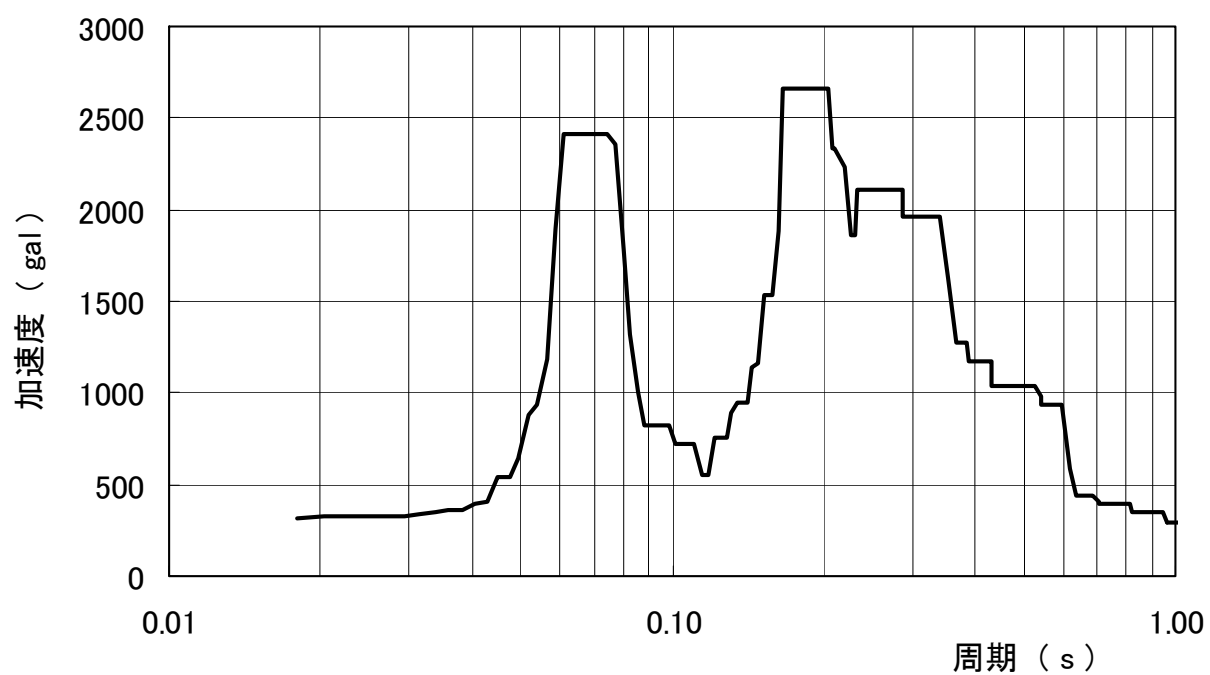


Fig. 6 飽和温度キャプセルの計算モデル図



(炉室1F、 炉容器頂部および炉内グリッドを包絡、減衰比1%)

Fig. 7 床応答スペクトル図

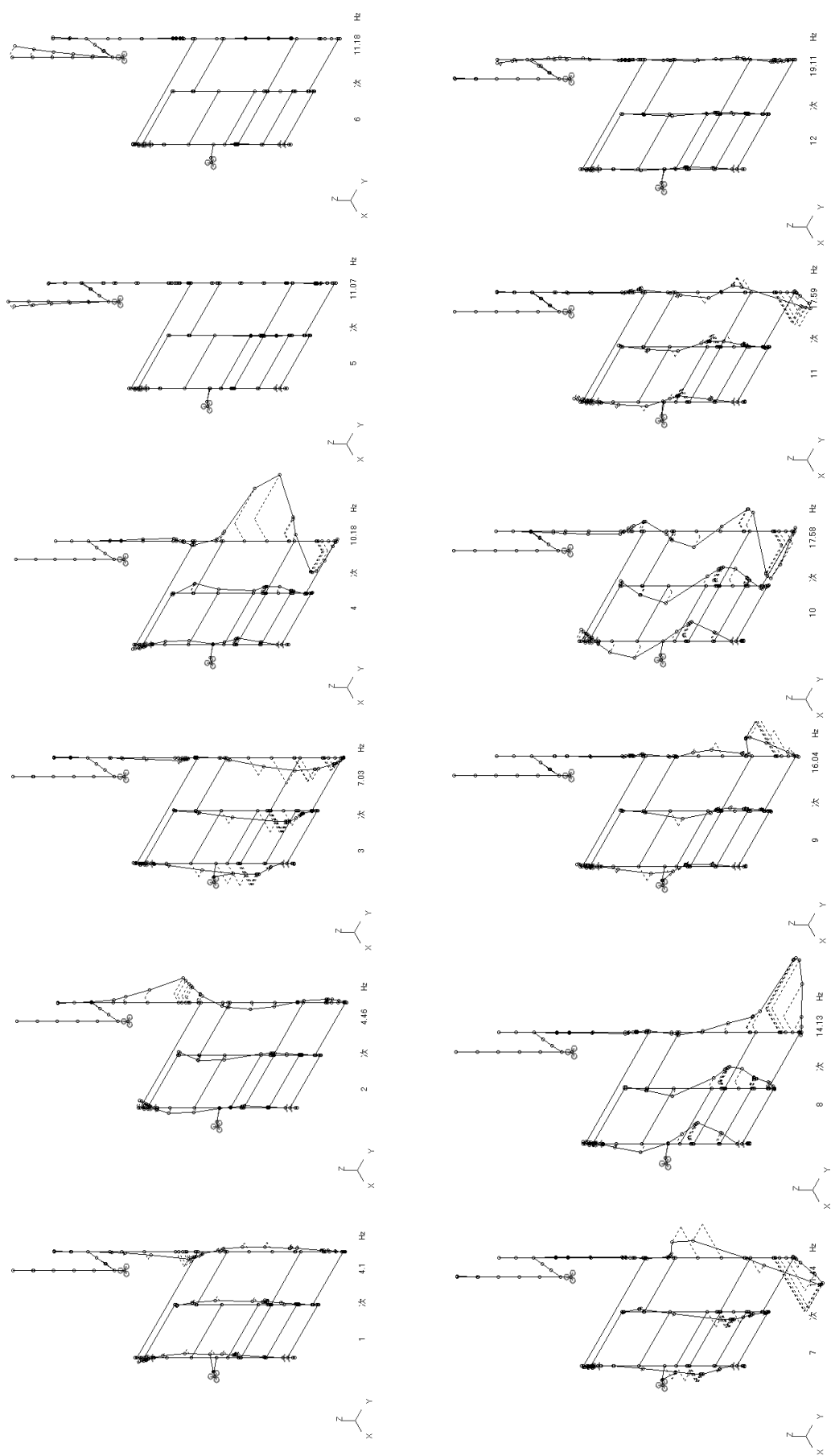


Fig. 8 OSF-1 炉内管の振動モード図

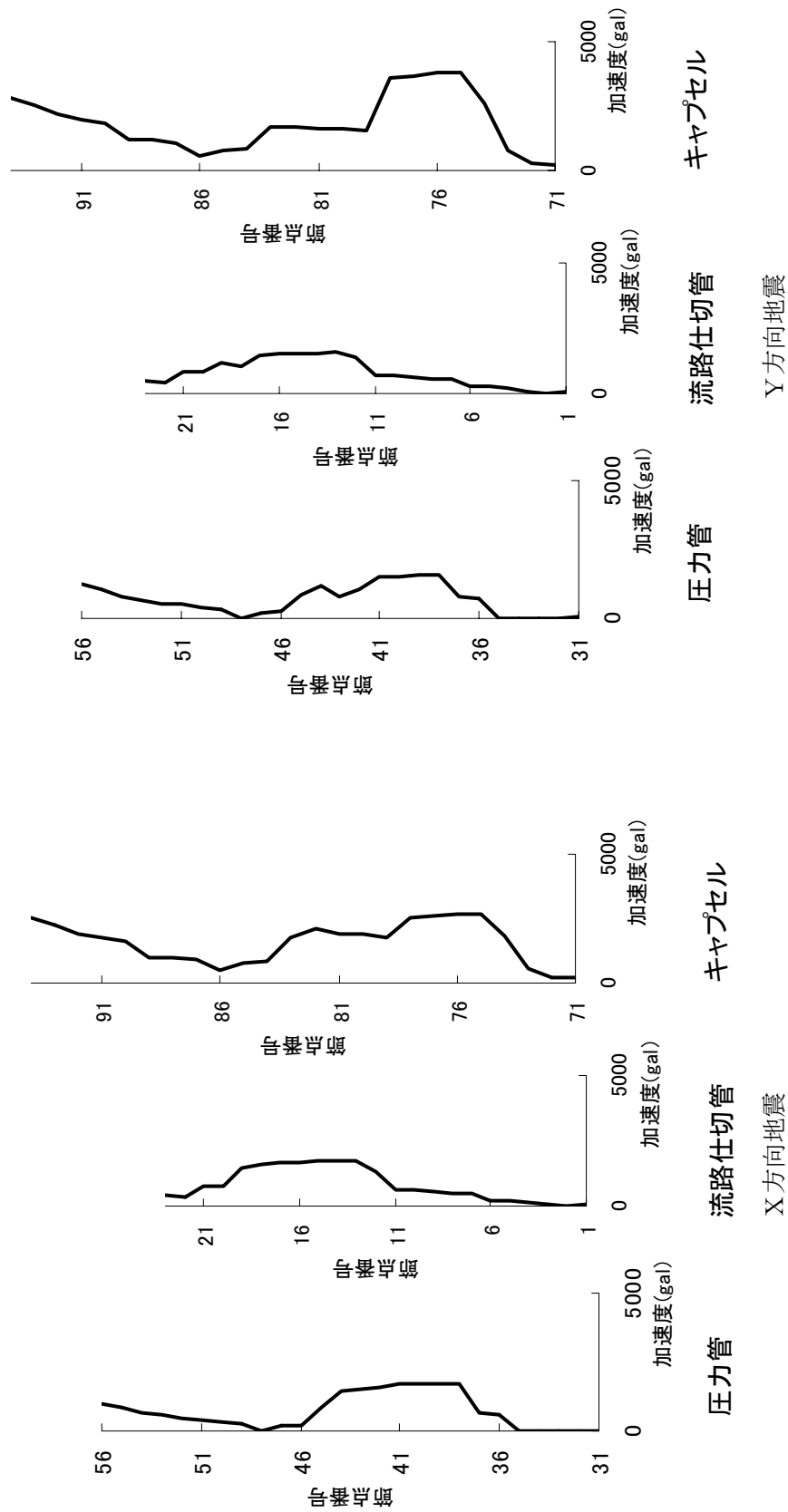


Fig. 9 OSF-1 炉内管の応答加速度分布図

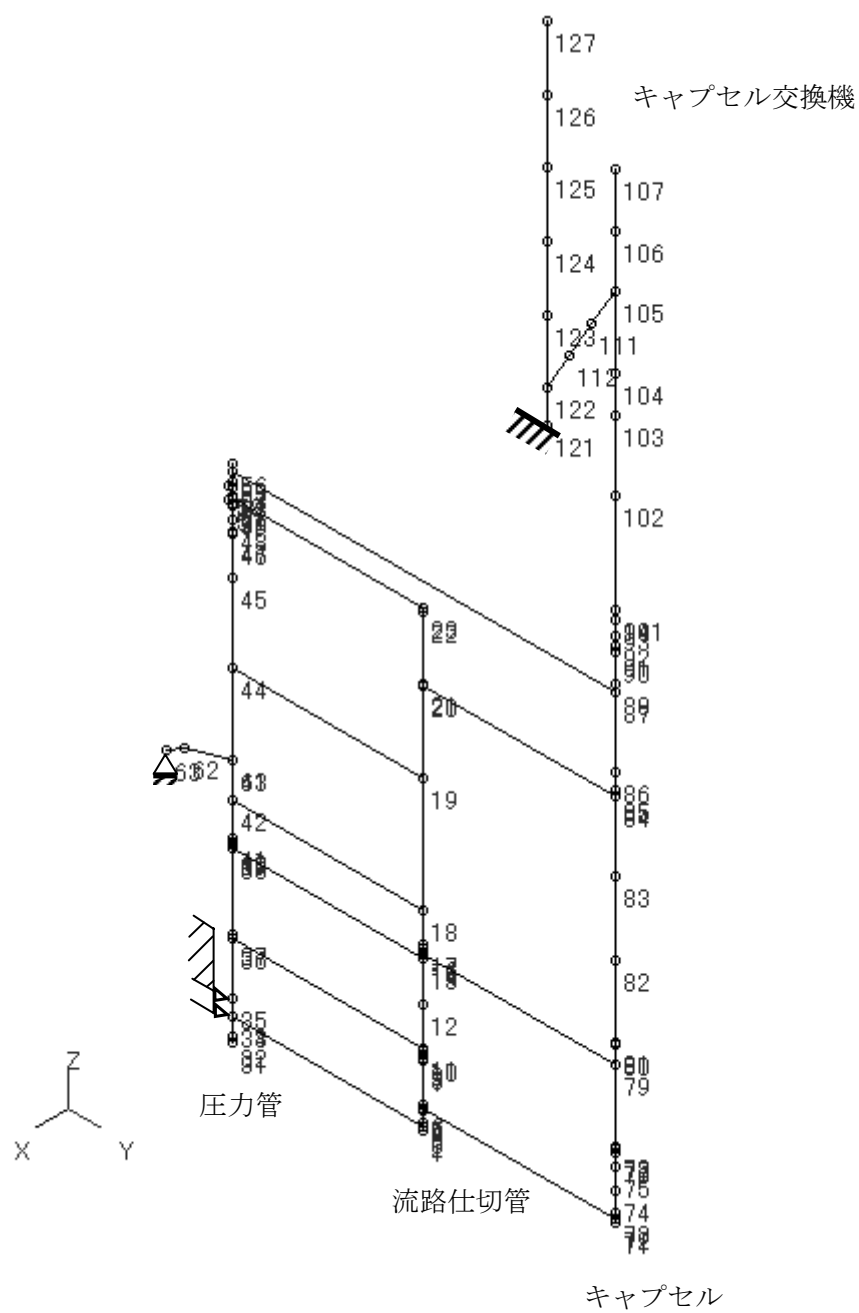
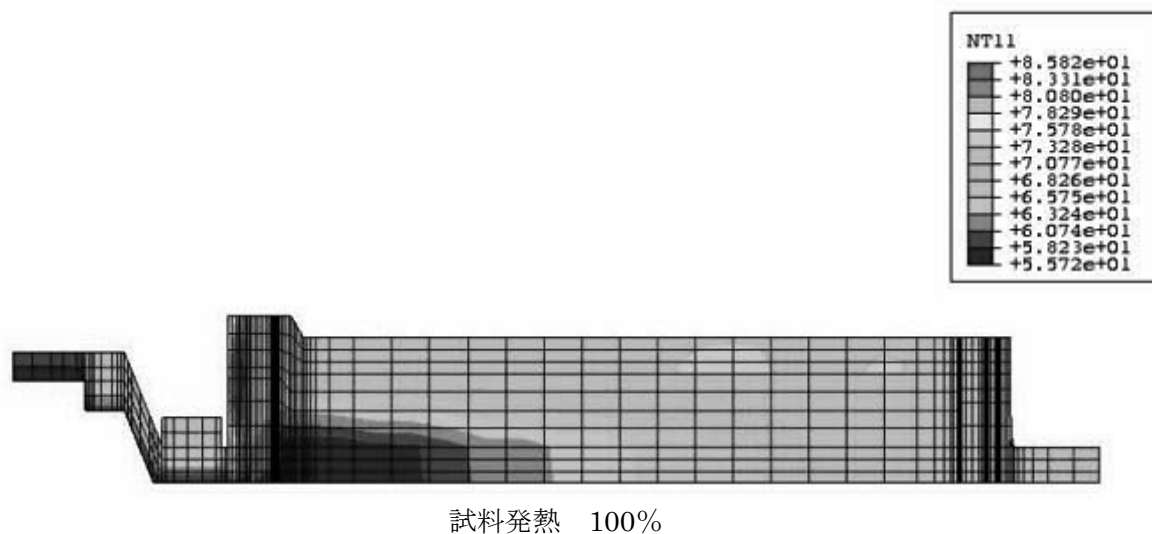


Fig. 1 0 OSF-1 炉内管の応力評価箇所

(単位 : °C)



(単位 : °C)

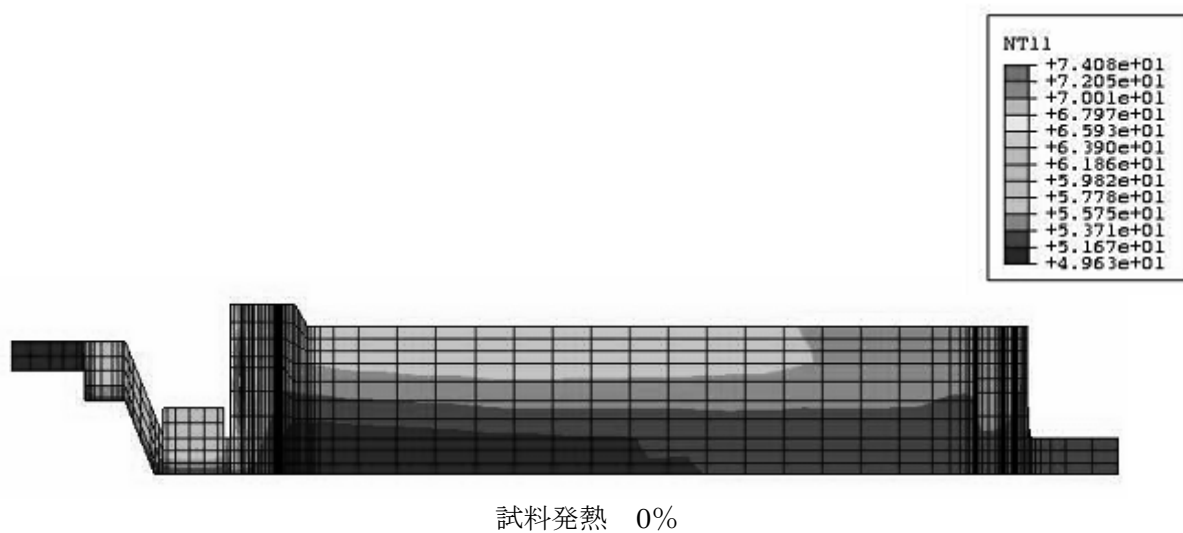


Fig. 1 1 ガスクリーン温度分布計算結果

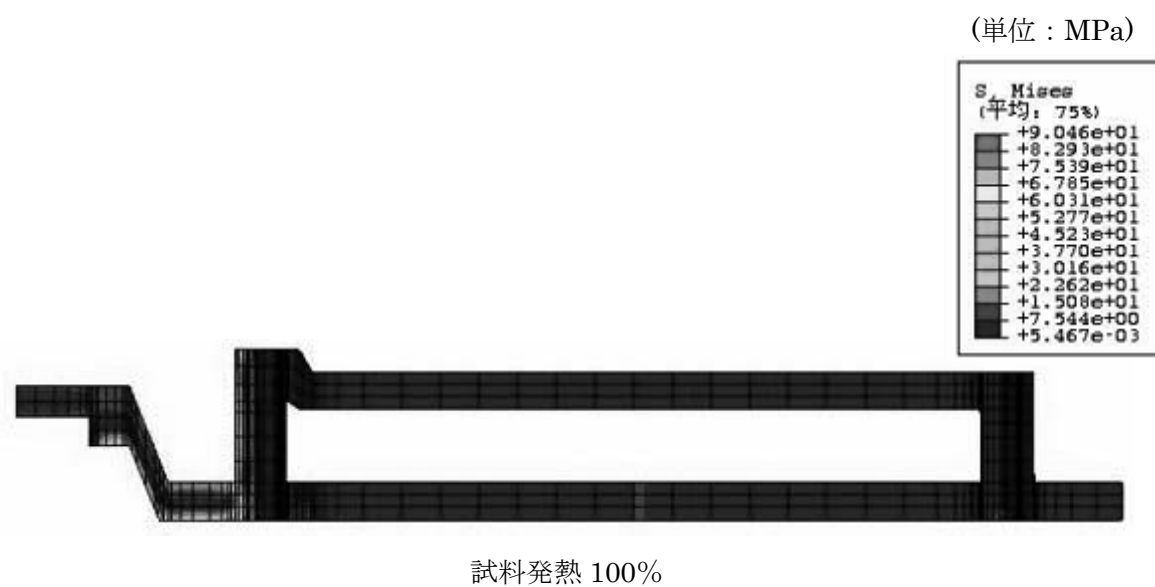
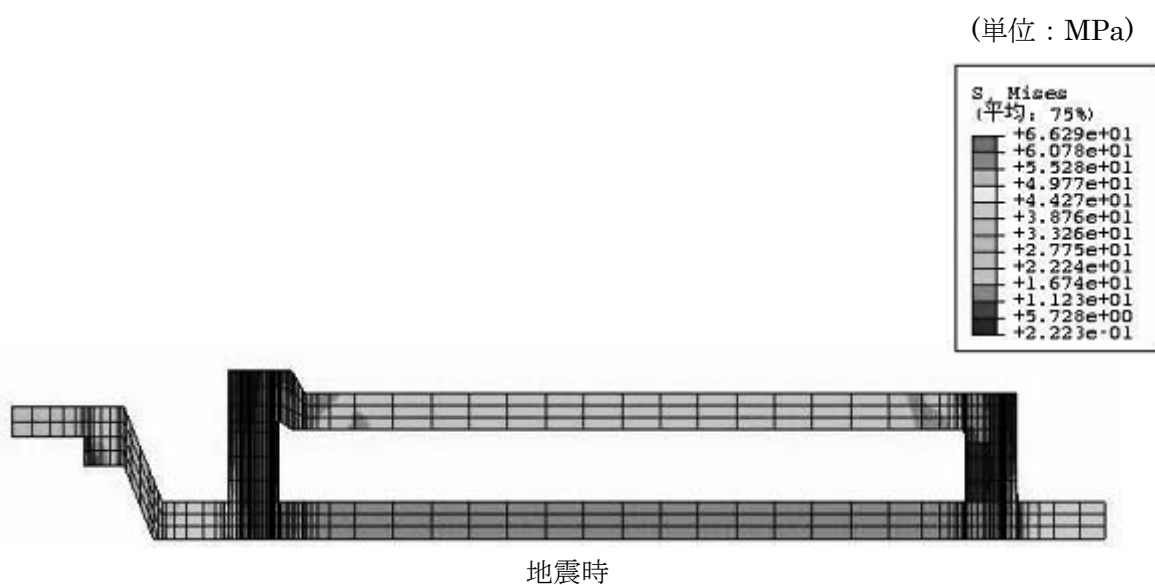


Fig. 1 2 各荷重によるガスクリーン応力分布

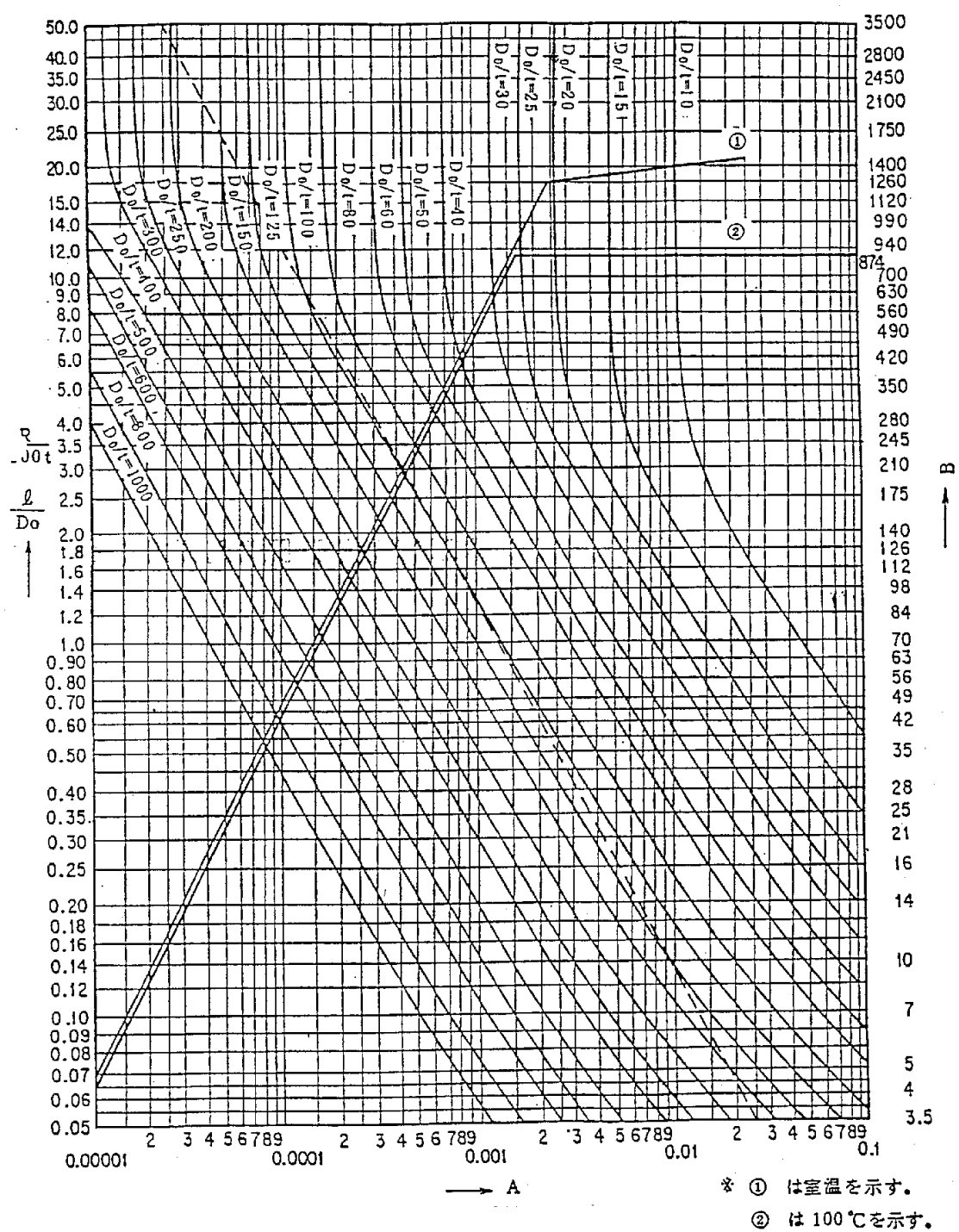


Fig. 1 3 ジルカロイ-2の荷重計算用図

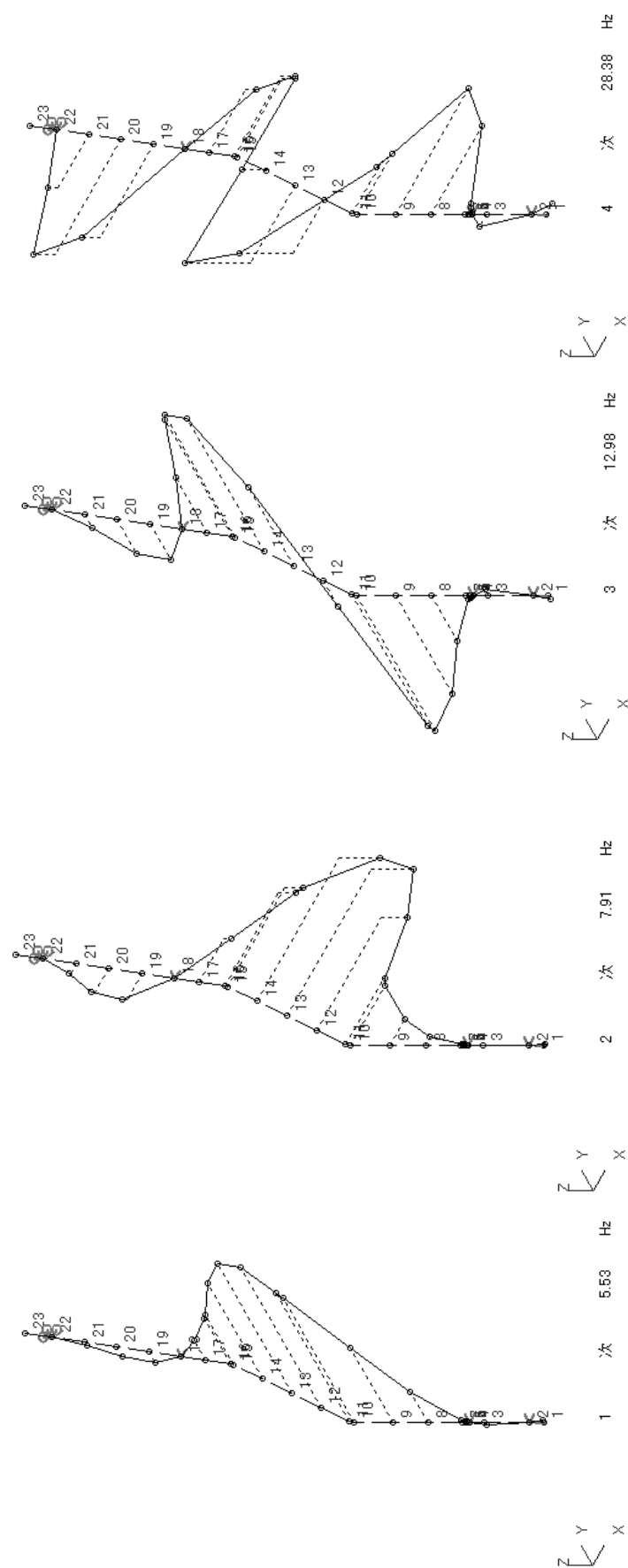


Fig. 1 4 飽和温度キャプセルの振動モード図(Hf-He 照射-G10 一例)

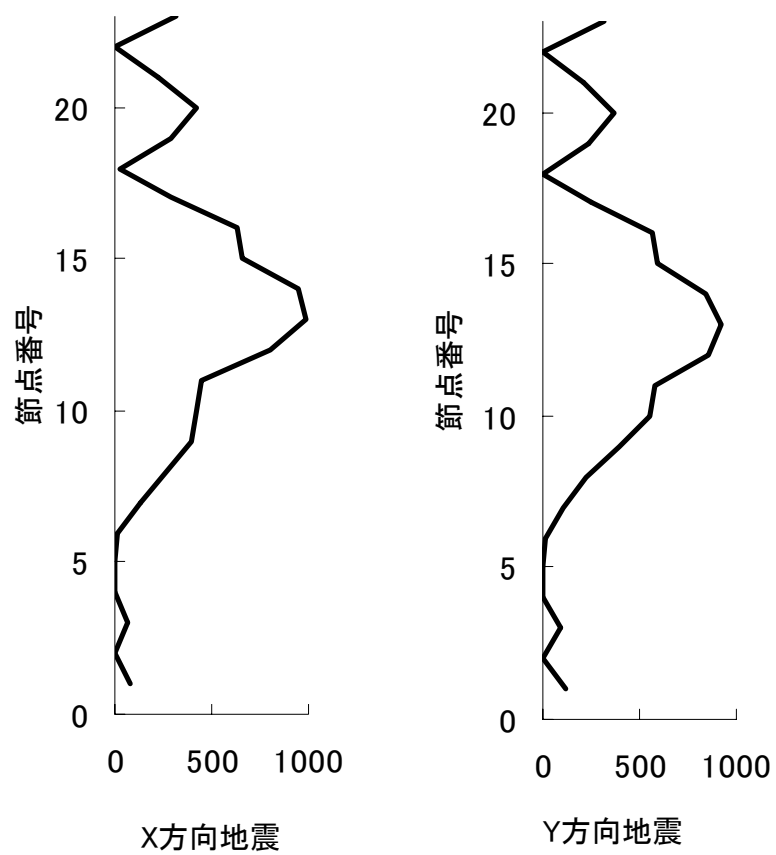


Fig. 1 5 飽和温度キャプセルの応答加速度分布(Hf-He 照射-G10 一例)

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	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	立方メートル	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	
比透磁率 ^(b)	(数字の)	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	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²	
磁束	ウェーバ	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	
セルシウス度 ^(e)	セルシウス度 ^(e)	°C		K	
光強度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd	
放射	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	
酸素活力	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)ヘルシウス度についてはのみ、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	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 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm 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)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻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)×10 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 ⁵ Pa
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
バイン	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。
ベベル	B	
デジベール	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
ボア	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
スチルプ	sb	1 sb =1cd cm ² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォトル	ph	1 ph=1cd sr cm ² 10 ⁴ lx
ガリ	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 ≐ (10 ³ /4π)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=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻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 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	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）
マイクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m

