



JAEA-Technology

2007-008



JP0750066

IFMIF液体リチウムターゲット背面壁の熱構造解析

Thermo-Structural Analysis of Backwall in IFMIF Lithium Target

中村 博雄 井田 瑞穂 清水 克祐* 杉本 昌義

Hiroo NAKAMURA, Mizuho IDA, Katsusuke SHIMIZU* and Masayoshi SUGIMOTO

核融合研究開発部門

IFMIF開発グループ

IFMIF Development Group
Fusion Research and Development Directorate

March 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAES
Technology

本レポートは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/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っておりまます。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
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
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

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

IFMIF 液体リチウムターゲット背面壁の熱構造解析

日本原子力研究開発機構
核融合研究開発部門 核融合エネルギー工学研究開発ユニット
中村 博雄、井田 瑞穂*、清水 克祐*、杉本 昌義

(2007 年 1 月 17 日受理)

本報告は、平成 15 年度から 17 年度に実施した、国際核融合材料照射施設(IFMIF)の液体リチウム(Li)ターゲット背面壁の熱構造解析について取り纏めたものである。IFMIF は、核融合炉材料開発のための、D-Li ストリッピング反応による加速器型の高エネルギー中性子照射施設である。液体 Li 流中で発生した高エネルギー中性子は、ターゲットアセンブリの背面壁と呼ばれる薄い壁を通過して、テストセル内の照射試料を照射する。背面壁は、ステンレス鋼 316L または低放射化フェライト鋼 F82H であり、リップシール溶接によりターゲットアセンブリに取り付けられている。背面壁の中心部では、1 年あたり 50 dpa の中性子照射を受け、最大で 25W/cm^3 の核発熱が発生するため、熱構造設計がターゲット設計の重要課題の一つである。熱応力評価には、ABAQUS を用いた。熱応力の許容値は、300°Cでの非照射材の降伏応力とした。その結果、背面壁がステンレス鋼 316L の場合、背面壁中心部の熱応力は、許容値 164 MPa を超える。一方、背面壁が低放射化フェライト鋼 F82H の場合、熱応力は 289 MPa であり、許容値 455 MPa 以下であった。以上の結果、F82H は背面壁の有力な候補材料である。

那珂核融合研究所（駐在）：〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

* 技術開発協力員

* 三菱重工業（株）

Thermo-Structural Analysis of Backwall in IFMIF Lithium Target

Hiroo NAKAMURA, Mizuho IDA[※], Katsusuke SHIMIZU^{*} and Masayoshi SUGIMOTO

Division of Fusion Energy Technology
Fusion Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Naka-shi, Ibaraki-ken

(Received January 17, 2007)

This report describes results of thermo-structural analysis of a backwall in IFMIF lithium target performed during FY2003-2006. The IFMIF is an accelerator-based intense neutron source for testing candidate materials for fusion reactors. Intense neutrons are emitted inside the Li flow through a backwall. The backwall made of 316L stainless steel or RAFM is attached to the target assembly with a lip seal welded by a YAG laser. Since the backwall is operating under a severe neutron irradiation of 50 dpa/year and a maximum nuclear heating rate of 25 W/cm³, thermo-structural design is one of critical issues in a target design. Thermal stress was calculated using the ABAQUS code. As a permissible stress, yield strength at 300 °C was used. In a case of the 316L stainless steel backwall, the maximum thermal stress was beyond the permissible stress (164 MPa). On the other hand, in a case of the F82H backwall, a maximum thermal stress was 289 MPa below the permissible stress (455 MPa). Therefore, F82H is recommended as the backwall material.

Keywords : IFMIF, Fusion Material, Neutron Irradiation, Liquid Lithium Target, Nuclear Heating, Thermal Stress, ABAQUS

※ Cooperative Staff

* Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

目次

1.はじめに	1
2. IFMIFのターゲット系と背面壁	1
3. 热構造解析	4
3.1 解析コードと解析モデル	4
3.2 解析条件	7
3.2.1 温度解析	7
3.2.2 応力解析	10
3.2.3 材料および物性値	11
3.3 解析結果	11
3.3.1 解析ケース	11
3.3.2 SUS316L 製背面壁	11
3.3.3 F82H 製背面壁	23
4.まとめ	27
謝辞	27
参考文献	28

Contents

1. Introduction	1
2. IFMIF Target System and Backwall	1
3. Thermo-Structural Analysis	4
3.1 Analytical Code and Model	4
3.2 Analytical Conditions	7
3.2.1 Thermal Analysis	7
3.2.2 Structural Analysis	10
3.2.3 Materials and their Properties	11
3.3 Results	11
3.3.1 Analytical Case	11
3.3.2 SUS316L Backwall	11
3.3.3 F82H Backwall	23
4. Summary	27
Acknowledgement	27
References	28

1. はじめに

国際核融合材料照射施設(IFMIF)は、核融合炉材料開発のための高エネルギー中性子照射施設であり、最大エネルギー40MeV、最大電流 250mA の重陽子(D)ビームを液体リチウム(Li)のターゲットに入射して、D-Li ストリッピング反応により、1年あたり平均損傷 20 dpa の中性子照射に必要な核融合模擬中性子を発生させる。IFMIF 計画では、国際エネルギー機関(IEA)のもとで、日本、欧州、米国、ロシアの国際協力で、1995 年から概念設計活動[1], [2]を開始し、2000 年から 2002 年にわたり要素技術確証活動[3], [4]を実施した。現在、次段階の工学設計・工学実証フェーズに向けて、移行期活動を実施中である[5]。IFMIF のターゲット系は、最大パワー10MW の重陽子ビーム入射の条件下で、最大流速毎秒 20m の自由表面を有する液体リチウム流を安定に流動させる機能を有する。液体リチウム流中に発生した高エネルギー中性子は、ターゲットアセンブリの背面壁と呼ばれる薄い壁を通過して、テストセル容器に格納された照射試料を照射する。背面壁の中心部では、1年あたりの 50 dpa の中性子照射を受け、最大で 25W/cm^3 の核発熱が発生する。そのため、背面壁では中性子による放射化が最も大きく、遠隔操作による交換可能な構造設計が必要になる。また、核発熱に対応した熱構造設計も必要である。

本報告では、それらの要求を満足する背面壁の設計のために、平成 15 年度から 17 年度に実施した、IFMIF の液体 Li ターゲット背面壁の熱構造解析について取り纏めた。

2. IFMIF のターゲット系と背面壁

IFMIF のターゲット系の役割は、1年あたり平均損傷 20dpa の中性子照射に必要な核融合模擬中性子を安定に発生するために、最大エネルギー40MeV、最大電流 250mA の重陽子ビーム入射の標的として、自由表面を有する高速の液体 Li 流を長時間安定かつ安全に実現することである[6]。入射パワー10MW の重陽子ビームによる、Li 流の自由表面への熱負荷は、平均で 1GW/m^2 にも達し、このような超高熱負荷の除熱のため、最大流速毎秒 20m の高速液体リチウム流が必要である。また、長時間運転時の機器の損耗・腐食を軽減するため、液体 Li 中に混入する酸素や窒素等の不純物の除去系、機器交換のための遠隔操作機器、Li ループの運転状況を把握するための計測系、Li 取扱いの安全系も必要である。ターゲット系の主要な設計条件を、Table 2-1 に示す[7]。ターゲット系は、ターゲットアセンブリと Li ループに、大きく分類される。基本構成を、Fig. 2-1 に示す。ターゲットアセンブリの断面図を、Fig. 2-2 に示す。ターゲットアセンブリは、ノズルおよび背面壁で構成される。ノズルは、安定な高速 Li 流を実現するため、ポテンシャル流理論による島のモデルに基づいた二段絞り方式が採用されている[8]。Li 流は、ノズルから噴出し、曲面の背面壁に沿って流れれる。ビーム入射側の Li 面は、 10^{-3} Pa の真空雰囲気に面しており、自由液面と呼ばれる。この自由液面では、波高の許容値は、Li 流中のビーム入熱分布の変動から背面壁を保護するため、1mm である。また、背面壁は、曲率 25cm の曲面形状であり、遠心力により、Li の沸点を増加させて沸騰を防ぐ工夫をしている[9]。ターゲット系の構造材料は、背面壁を除き、

ステンレス鋼 316L である。背面壁の候補材は、ステンレス鋼 316L および低放射化フェライト鋼である。背面壁は、遠隔交換可能な構造にする必要があり、日本が提案の YAG レーザーによるリップシールの切断・再溶接方式と欧州が提案のスライド構造背面壁によるバイオネット方式の二つが検討されている。本解析では、日本案のリップシール方式に対して解析を行った。

Table 2-1 Major specifications of IFMIF target system

Items	Parameters
Deuterium Beam energy/current	40 MeV / 125 mA (nominal) x 2 accelerators
Averaged heat flux	1 GW/m ²
Beam Deposition Area on Li Jet	0.2 m ^W x 0.05 m ^H
Jet Width / Thickness	0.26 m / 0.025 m
Jet Velocity	15 (range 10 ~ 20) m/s
Wave amplitude of Li free surface	< 1 mm
Flow Rate of Li	8 m ³ /min (at target section)
Curvature of back wall	0.25 m
Inlet Temperature of Li	250°C (nominal) to 300 °C
Vacuum Pressure	10 ⁻³ Pa at Li free surface 10 ⁻¹ Pa in target/test cell room
Hydrogen Isotopes Content	< 10 wppm (< 1 wppm:T)
Impurity Content	<10 wppm (each C,N,O)
Materials (back wall) (Other components)	316L stainless steel or RAF steel 316L stainless steel
Erosion/corrosion thickness (Nozzle and back wall) (Pipings etc.)	< 1 mm /year < 50 mm /30 years
Replacement	every 11 month for back wall No replacement for 30 years (other components)
Availability	> 95 %

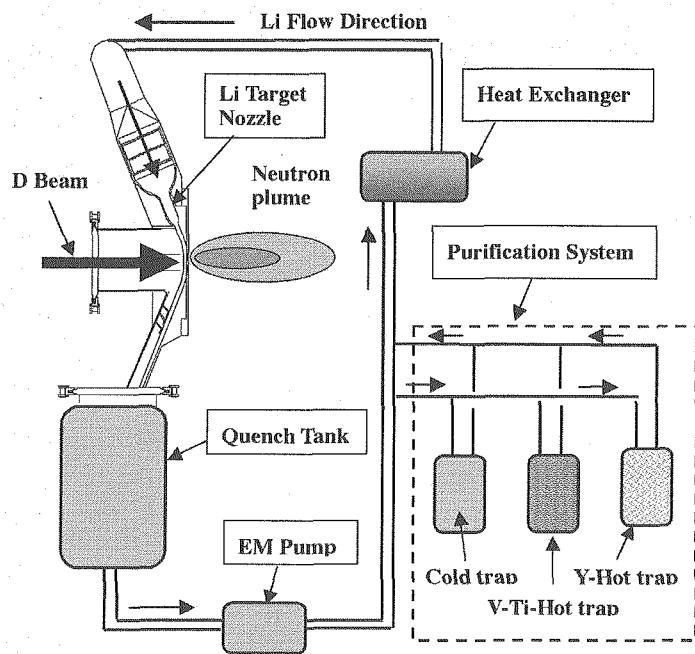


Fig.2-1 Block Diagram of IFMIF Lithium Target System

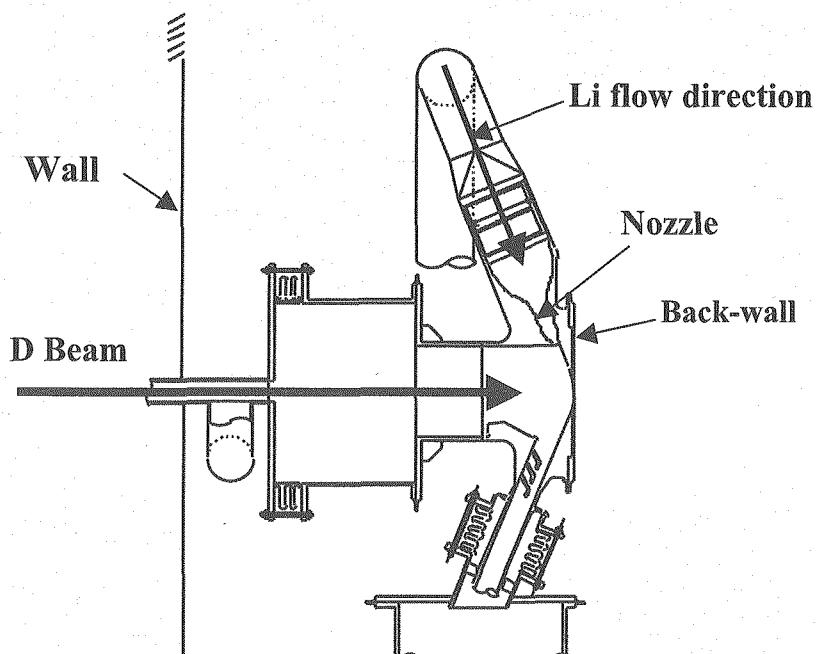


Fig.2.2 Cross section of target assembly

3. 热構造解析 [10]

3.1 解析コードと解析モデル

本解析では、汎用解析コード ABAQUS-Ver. 6.4.1 を使用した[11]。液体リチウムターゲットの背面壁の基本構造を Fig. 3.1-1 に示す。

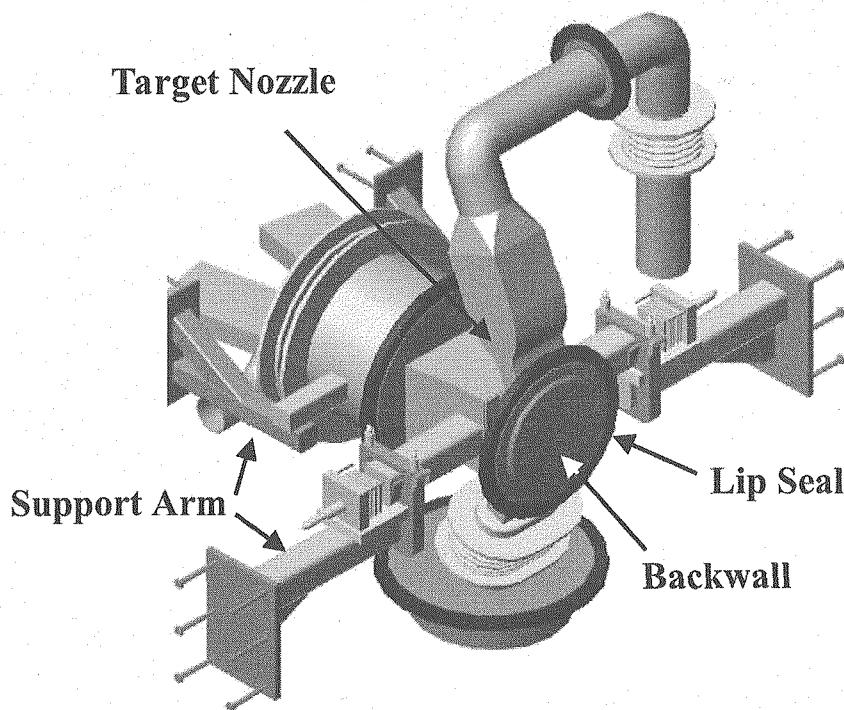


Fig.3.1-1 Three-dimensional View of IFMIF Lithium Target Assembly

ノズルから噴出した高速 Li 流は、曲面の背面壁に沿って、中心部近傍の重陽子ビーム入射領域へと流れる。Fig. 3.1-1 に示すように、背面壁は円形平板構造をしており、背面壁外周部のリップシールとターゲットアセンブリ側のリップシールが、YAG 溶接により接合される。接合部は、クランプにより固定される。ビーム入射面側では、液体金属 Li と境界を有する部位以外は、ターゲットアセンブリ本体と熱的に接触する。背面壁のビーム入射面側と反対側には、2mm 離れたところに照射試料を格納したテストセルアセンブリと呼ばれる構造体が置かれる。

基本構造をもとに、背面壁を Fig. 3.1-2 のような平面円盤構造にモデル化した。Fig. 3.1-3 に、基本寸法を示す。背面壁は、外周部のリップシール部で、直径 715mm である。背面壁中心部の最も薄い部分は 1.8mm である。ABAQUS コード用の有限要素 (FEM) メッシュモデルは、構造および核発熱分布の対称性より、Fig. 3.1-4 に示すように、90° 分の 1/4 モデルとする。熱応力は、弾性解析によりを評価した。FEM メッシュの規模は、要素数が 35170、節点数が 40338 である。また、温度解析（伝熱要素）および応力解析（応力／変位要素）では、6 節点と 8 節点の要素を用いた。

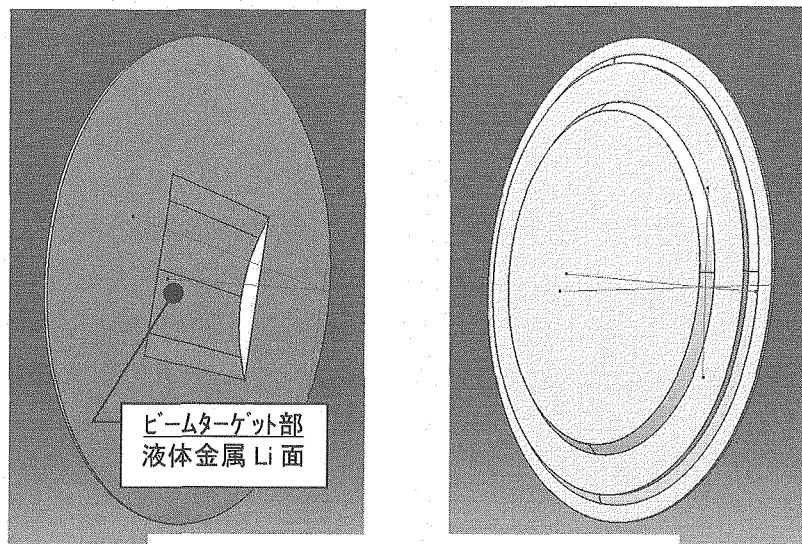


Fig.3.1-2 Model of the backwall

- (a) Beam side view
- (b) Test cell side view

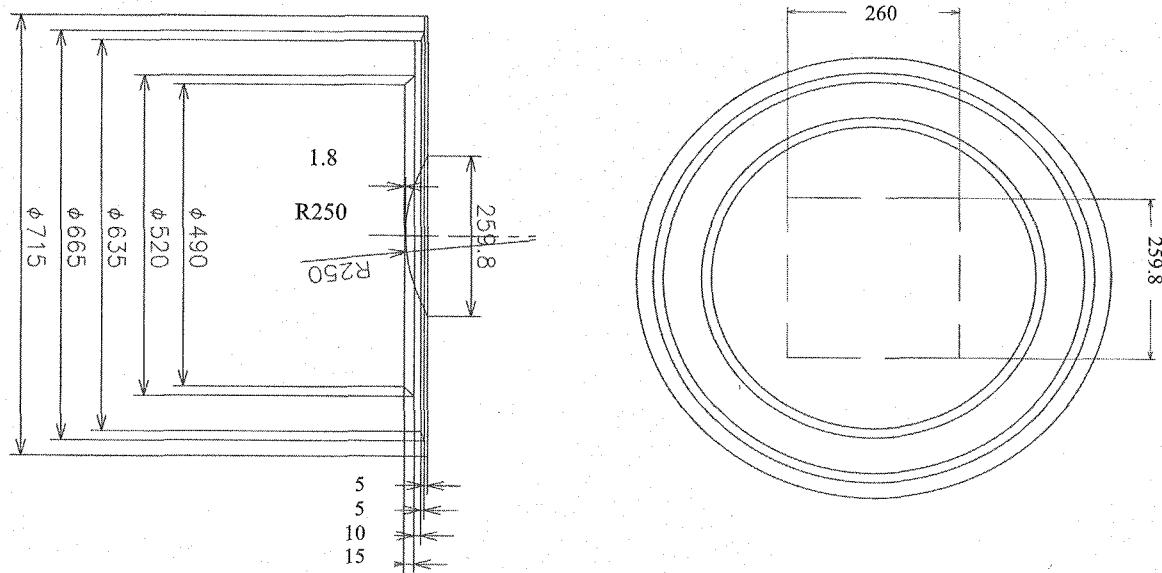


Fig.3.1-3 Dimensions of the backwall

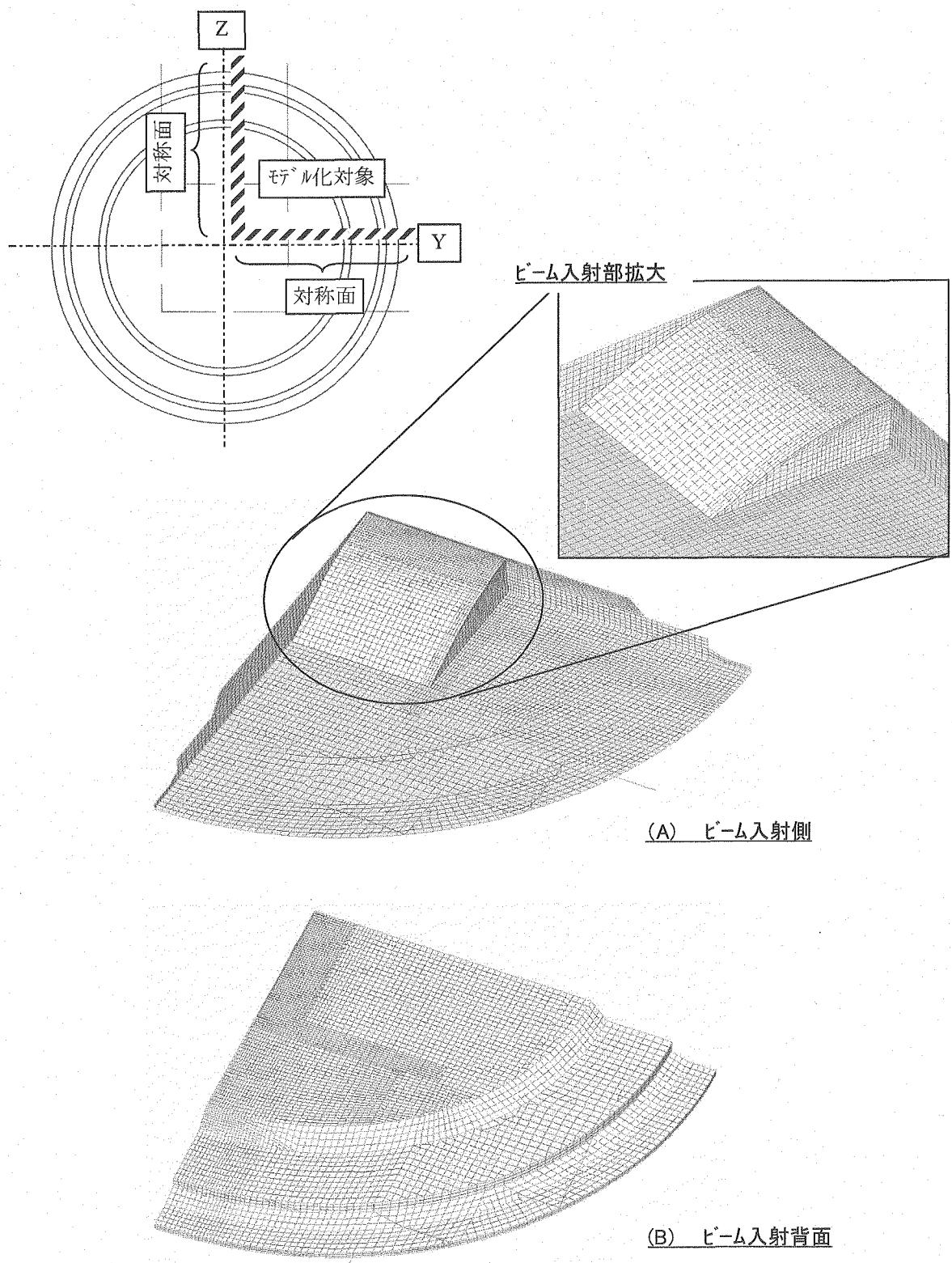


Fig.3.1-4 Mesh model of ABAQUS code

3.2 解析条件

3.2.1 温度解析

(1) 核発熱率分布

核発熱率分布は、IFMIF の概念設計時に、MCNP コードを用いて、I. Gomes により評価されたデータを適用した[12]。IFMIF の最大定格運転時(40MeV-250mA)の、背面壁の核発熱率分布を Fig. 3.2-1 に示す。中心部の最大核発熱率は、 25.1W/cm^3 であり、背面壁のビームが入射する部位の核発熱率は高く、周辺に行くに従い、減少していく。背面壁の板厚方向にも核発熱分布があると予想されるが、今回の解析では板厚方向は均一とする。

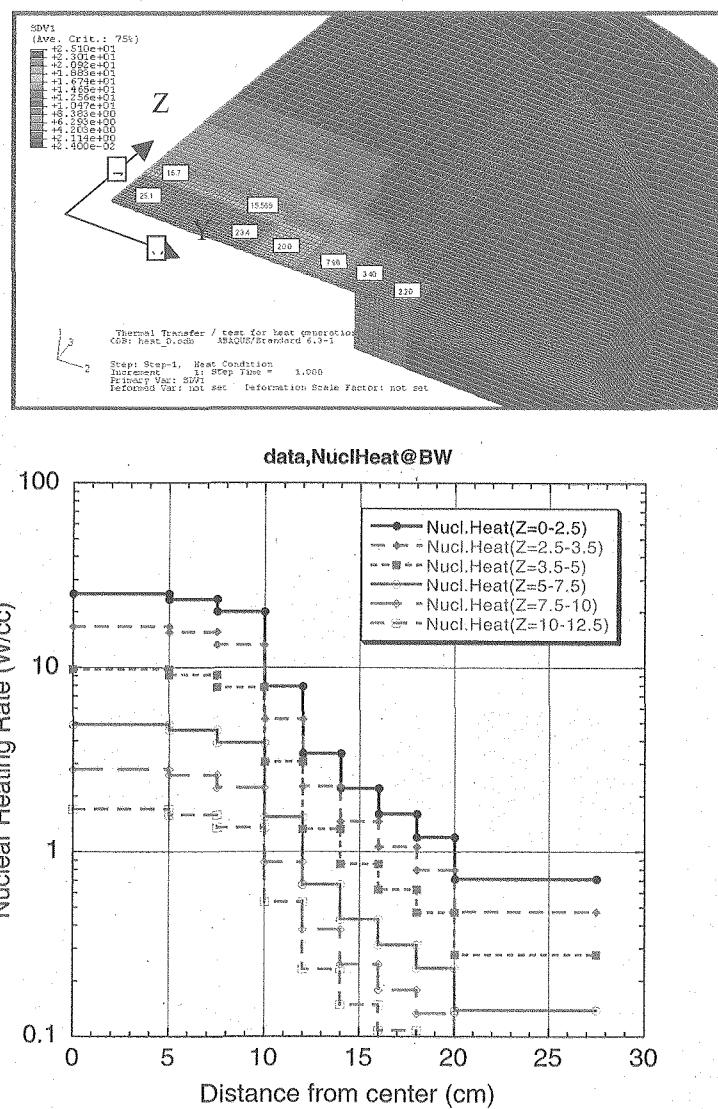


Fig.3.2-1 Spacial distribution of nuclear heating rate

(2) 热伝達条件

境界条件の模式図を、Fig. 3.2-2 に示す。背面壁の熱伝達境界は、液体 Li の流れと接する部位(α_1)及びターゲットアセンブリ本体 (Fig. 3.2-2 における α_2 の部分) と接触する部位となる。

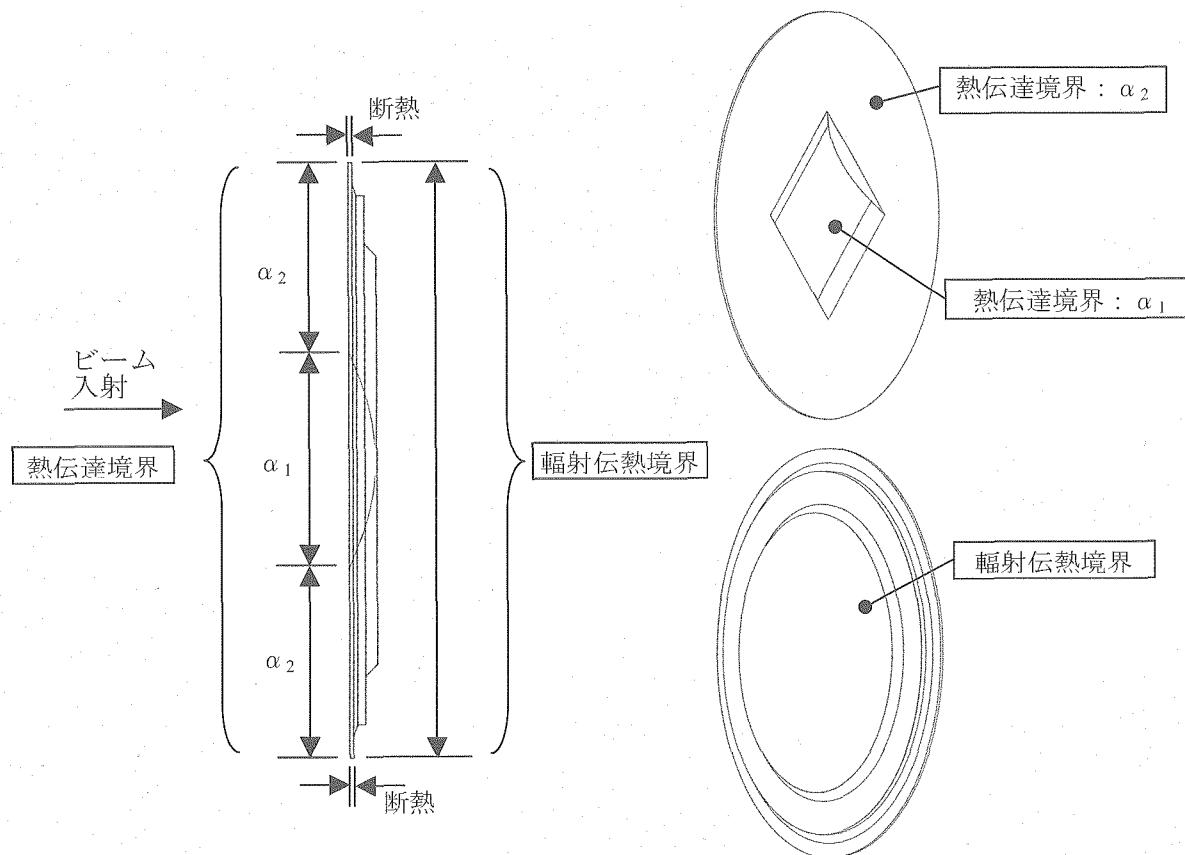


Fig.3.2-2 Boundary conditions of the backwall in thermal analysis

液体 Li 部の熱伝達係数は、宇田等により測定された、流速 1m/s 流動試験結果の磁場がゼロの実験結果から、以下の値を用いることとした[13]。流速 20m/s では、熱伝達係数の増加が予想されるが、解析結果には大きな影響は無い。

$$\alpha_1 = \text{Nu} \lambda / L = 34 \text{ kW/(m}^2 \cdot \text{K}) \quad (1)$$

ここで、Nu はヌッセルト数(=8)、 λ は熱伝導率 (=47 W/mK)、L は温度測定間距離(=0.011m)。

ターゲットアセンブリ本体との接触部の熱伝達係数は、部材の表面粗さ及び接触面圧より概算した。伝熱工学資料[14]より、接触熱伝達率 α_2 は以下のように与えられる。

$$\alpha_2 = 1.7 \times 10^5 / \{ [(\delta_1 + \delta_0)/\lambda_1] + [(\delta_2 + \delta_0)/\lambda_2] \} \cdot (0.6 \cdot P/H) \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}) \quad (2)$$

ここで、

- δ_0 : 定数 (μm)
- δ_1 : 固体 1 の粗さの最大高さ (μm)
- δ_2 : 固体 2 の粗さの最大高さ (μm)
- λ_1 : 固体 1 の熱伝導率 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)
- λ_2 : 固体 2 の熱伝導率 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)
- P : 接触面の押し付け圧力 (MPa)
- H : 柔らかい方の固体の硬さ (H_B または H_V) (MPa)

背面壁の条件 ($\delta_0 = 23 \mu\text{m}$, $\delta_1 = 6.3 \mu\text{m}$, $\delta_2 = 6.3 \mu\text{m}$, $\lambda_1 = 18.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $\lambda_2 = 18.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $H_V = 200 \text{ MPa}$) の場合の、接触熱伝達率の接触面圧依存性を Fig. 3.2.3 に示す。ターゲットアセンブリ本体 (Fig. 3.2-2 における α_2 の部分) と背面壁とはリップシールとクランプで締結されており、標準条件では、押し付け力を大気圧相当とし 0.1 MPa における熱伝達係数 (α_2) として、 $15.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ を採用する。解析では、背面壁の押し付け圧力の影響を把握し、背面壁およびクランプの今後の設計に反映させるため、押し付け力を 1 MPa まで実施した。

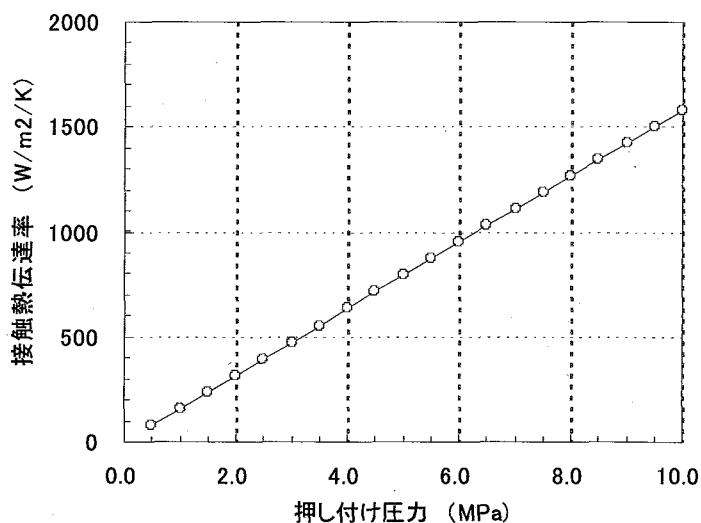


Fig. 3.2-3 Dependence of Contact thermal transfer coefficient on contact pressure

(3) 輻射境界

背面壁のビーム入射側の反対側の面は輻射境界とし、2mm 離れて、テストアセンブリ構造体が配置される。簡易モデルによる解析では、形態係数考慮の有無で、最高温度の差は 0.2%程度であった。そのため、輻射率は、SUS316L の機械研磨仕上げ程度の値として、SUS316L および F82H とともに、0.3 を用いた。温度解析では、テストアセンブリ構造体の温度は 50°C 及び 150°C の 2 ケースとする。輻射境界を設定するにあたり、形態係数による輻射伝熱の補正について影響評価を行った結果、背面壁は上記温度の構造体に完全に囲まれていると

いう条件としても大差ないことから、完全に囲まれている条件とする。

(4) その他の境界

背面壁の1/4モデルの対称面及びリップシールの背面壁端部は、断熱境界条件とする。

3.2.2 応力解析

3.2.1 節の定常温度解析によって得られた温度分布を用い、弾性熱応力解析を実施する。初期温度は各部とも 300°C 一様という条件より、応力基準温度を 300°C とする。構造、荷重の対称性及び支持条件より、境界条件を Fig. 3.2.4 に示す。リップシール端部の拘束条件が、背面壁の熱応力に与える影響を評価するために、リップシール端部の境界条件が完全拘束および回転拘束 (Y, Z 方向は自由) の場合について、解析を実施する。

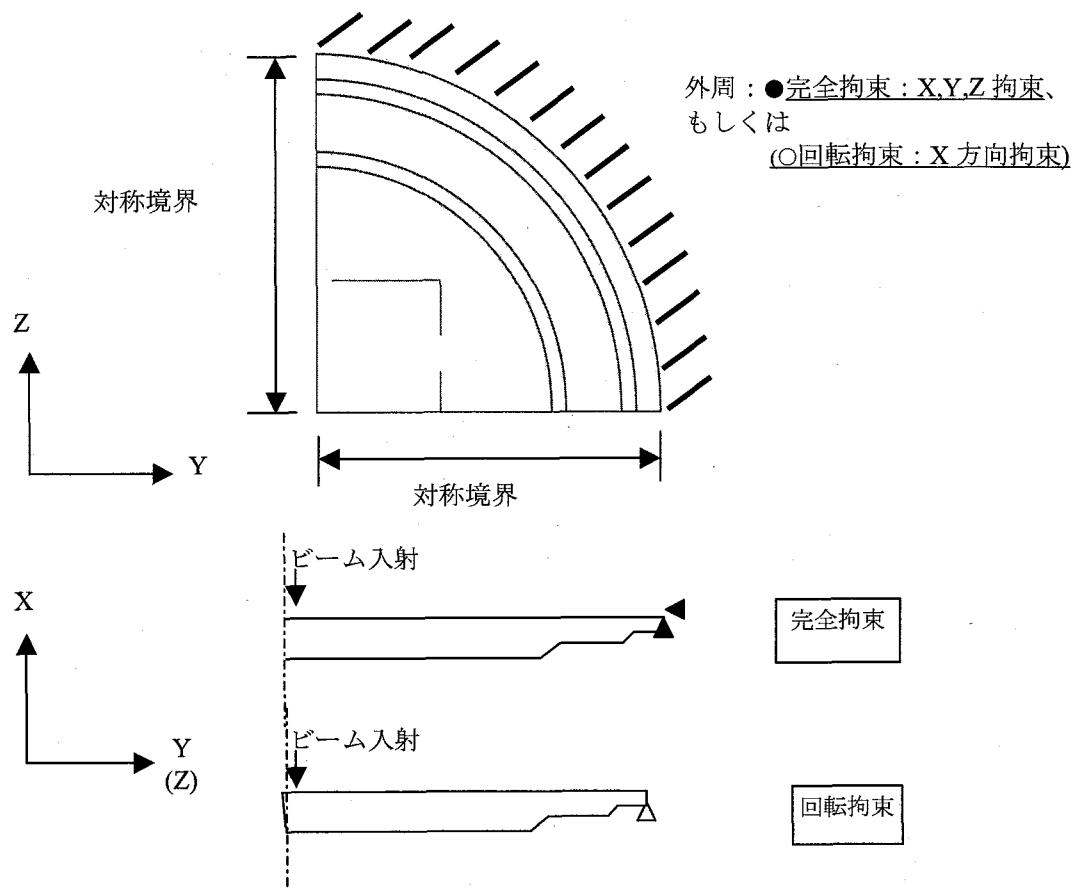


Fig.3.2-4 Boundary conditions of the backwall in thermal stress analysis

3.2.3 材料および物性値

材料は SUS316L 相当および低放射化フェライト鋼 F82H とし、材料物性値の温度依存性を考慮し、熱応力解析を行う。使用した熱伝導率($\lambda: \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)、ヤング率(E)、ボアソン比(v)、線膨張率(α_m)を、それぞれ、次に示す。線膨張率は、平均線膨張率 (α_m) を使用した。温度(T)は、絶対温度表示である。

SUS316L

$$\text{熱伝導率} ; \lambda = 13.28571 + 1.756205 \times 10^{-2} \cdot T - 5.378788 \times 10^{-6} \cdot T^2 + 4.292929 \times 10^{-9} \cdot T^3 \quad (3)$$

$$\text{ヤング率} ; E = 200.3795 + 8.1221 \times 10^{-2} \cdot T \quad (4)$$

$$\text{ボアソン比} ; v = 0.2921 + 7.169 \times 10^{-5} \cdot T \quad (5)$$

$$\text{線膨張率} ; \alpha_m = 16.3153 + 4.9348 \times 10^{-3} \cdot T - 1.6585 \times 10^{-6} \cdot T^2 \quad (6)$$

F82H [15]

$$\text{熱伝導率} ; \lambda = 28.384 - 0.011777 \cdot T - 1.0632 \times 10^{-6} \cdot T^2 - 8.2935 \times 10^{-9} \cdot T^3 \quad (7)$$

$$\text{ヤング率} ; E = 218.76 - 0.077834 \cdot T + 1.4735 \times 10^{-4} \cdot T^2 - 2.1998 \times 10^{-7} \cdot T^3 \quad (8)$$

$$\text{ボアソン比} ; v = 0.3 \quad (9)$$

$$\text{線膨張率} ; \alpha_m = 9.0955 + 4.6477 \times 10^{-3} \cdot T - 1.2141 \times 10^{-6} \cdot T^2 \quad (10)$$

3.3 解析結果

3.3.1 解析ケース

解析は、以下のケースについて、温度や熱応力への依存性を調べた。

- a) 背面壁と近接するテストアセンブリ温度: (SUS316L)
- b) 背面壁のリップシール部の拘束条件: (SUS316L)
- c) 背面壁とターゲットアセンブリ本体との接触熱伝達係数: (SUS316L, F82H)
- d) 背面壁中心部の厚さ: (SUS316L, F82H)

3.3.2 SUS316L 製背面壁

(1) 温度解析

i) 辐射境界温度依存性

接触熱伝達率が $15.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、背面壁に近接して設置されるテストセル外表面の輻射境界温度が 50°C および 150°C とした場合の、背面壁の温度分布図を、Fig. 3.3-1 (輻射境界温度 : 50°C) 及び Fig. 3.3.2 (輻射境界温度 : 150°C) に示す。液体金属 Li 部と接触する部位は十分に冷却され、液体金属 Li 温度 (300°C) とほぼ等しい温度となっているが、背面壁中心部の近傍は、接触熱伝達率が小さいこと、輻射伝熱の効果が比較的低いこと、板厚が比較的厚いこと等の要因が重なり、温度が他の部位に比較して高くなつたと考えられる。最高到達温度は、Fig. 3.3-1 (輻射境界温度 : 50°C) が 440°C 、Fig. 3.3-2 (輻射境界温度 :

150°C) が 445°Cであり、テストセルの外表面温度が 50°Cと 150°Cでは、背面壁の温度に、大きな違いは見られない。

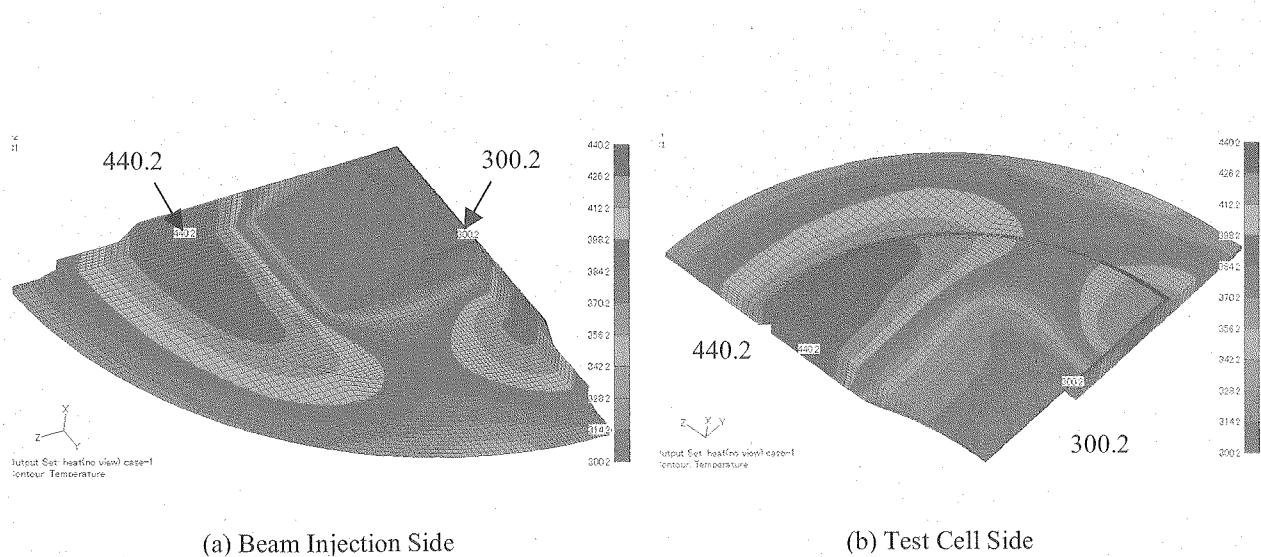


Fig.3.3-1 Contour of Temperature Distribution
(Temperature of test cell : 50°C, Contact Thermal Transfer Coefficient: 15.8 W/(m² · K))

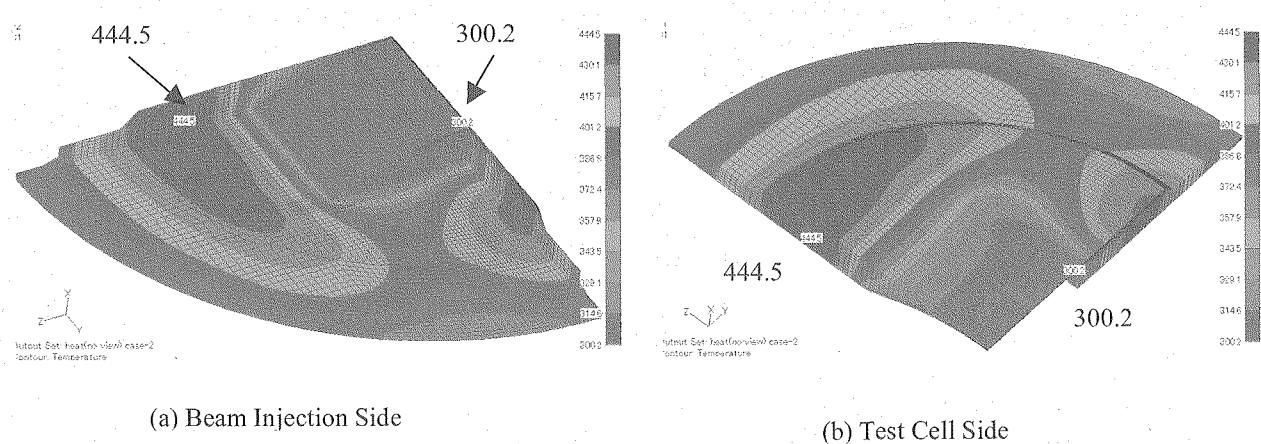


Fig.3.3-2 Contour of Temperature Distribution
(Temperature of test cell : 150°C, Contact Thermal Transfer Coefficient: 15.8 W/(m² · K))

ii) 接触熱伝達率および背面壁厚さ依存性

今後の背面壁取り付け方法検討の指針とするため、押し付け圧力が 0.5MPa（接触熱伝達率 : $79 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ）および 1MPa（接触熱伝達率 : $158 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ）での温度解析を行った。接触熱伝達率が $79 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ および $158 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の場合の背面壁温度分布を、Fig. 3.3-3 および Fig. 3.3-4 に示す。背面壁最高温度の押し付け圧力依存性を、Fig. 3.3-5 および Table 3.3-1 にまとめると。

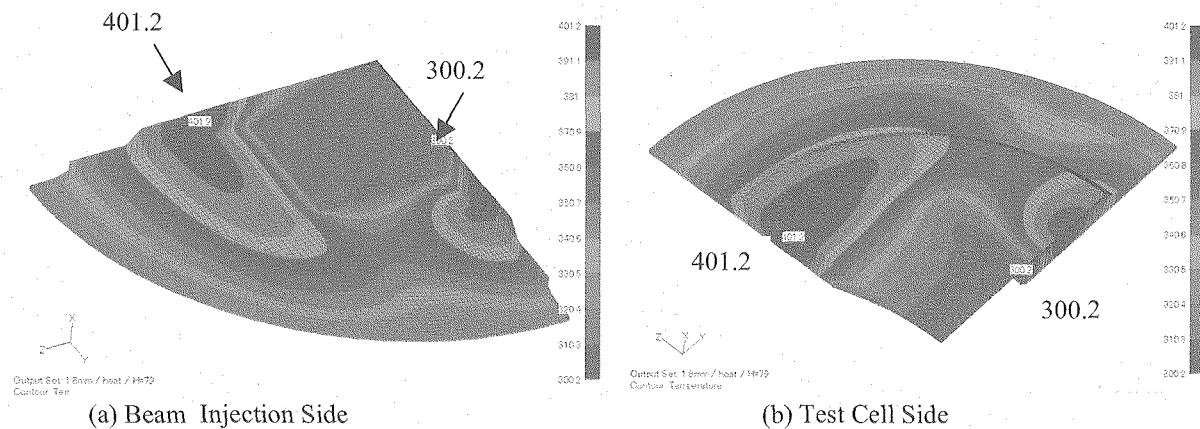


Fig.3.3-3 Contour of Temperature Distribution
(Temperature of test cell : 150°C , Contact Thermal Transfer Coefficient: $79 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)

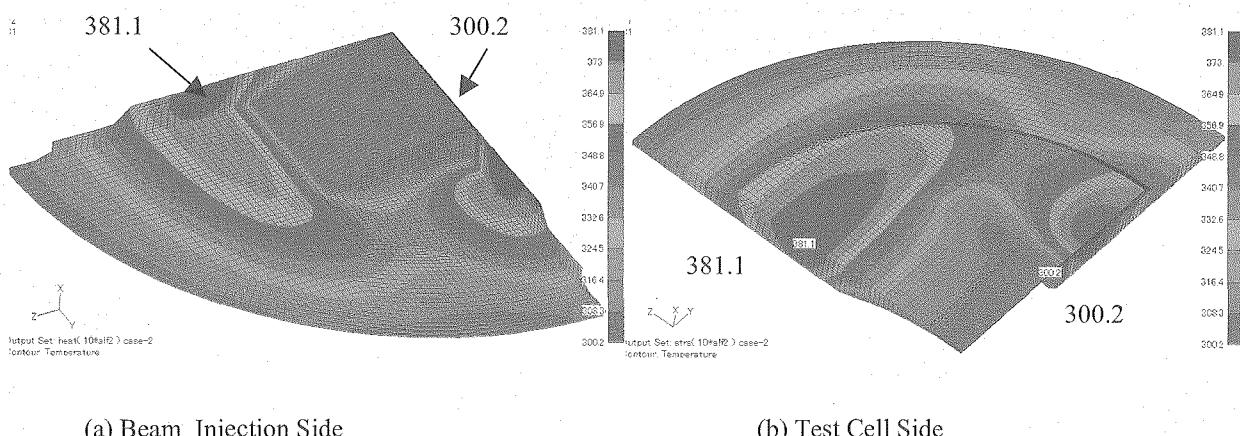


Fig.3.3-4 Contour of Temperature Distribution
(Temperature of test cell : 150°C , Contact Thermal Transfer Coefficient: $158 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)

Table 3.3-1 Maximum temperature of the backwall in case of different contact thermal transfer rate and minimum thickness

接触熱伝達率 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	輻射境界温度 : 50°C		輻射境界温度 : 150°C		
	背面壁最小厚さ		背面壁最小厚さ		
	1.8mm	1.8mm	3 mm	5 mm	
15.8	440°C	445°C	447°C	451°C	
79	未解析	401°C	未解析	408°C	
158	380°C	381°C	384°C	388°C	

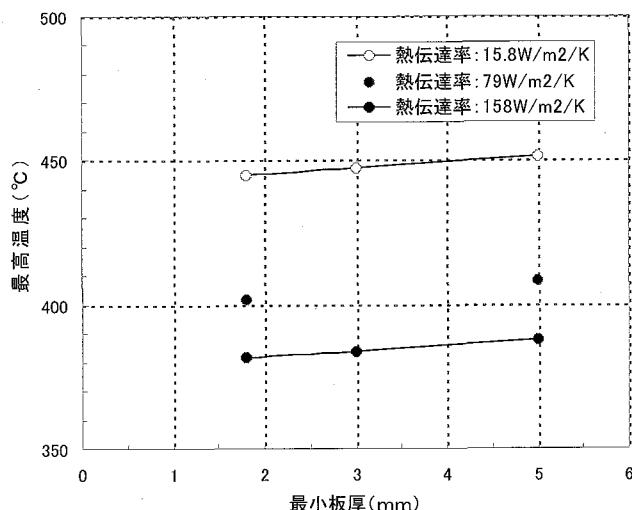


Fig.3.3-5 Effect of contact thermal transfer rate and minimum thickness on maximum temperature of the backwall.

接触熱伝達率を $158 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ とした場合の背面壁の最高温度は、輻射境界温度が 50°C の場合が 379.5°C 、輻射境界温度が 150°C の場合が 381°C であり、接触熱伝達率が $15.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の場合に比較して、約 60°C 低下した。一方、背面壁最小厚さを、標準条件の 1.8mm から 5mm まで変化させても、背面壁の温度には、大きな違いは見られなかった。

(2) 熱応力解析

i) 拘束条件依存性

リップシール端部の境界条件が完全拘束および回転拘束 (Y, Z 方向は自由) の場合についての熱応力解析を行った。二つの拘束条件における、最大応力と最大変位を、Table 3.3-2 に示す。この表には、参考のため、輻射境界温度が 50°C の場合の結果も示した。背面壁の流路の側面部の角では、応力集中の可能性もあり、コーナー部として併記した。輻射境界温度が 150°C の場合について、端部完全拘束の場合の応力分布および変位を、Fig. 3.3-6 および Fig. 3.3-7 に、端部回転拘束の場合の応力分布および変位を、Fig. 3.3-8 および Fig. 3.3-9 に示す。

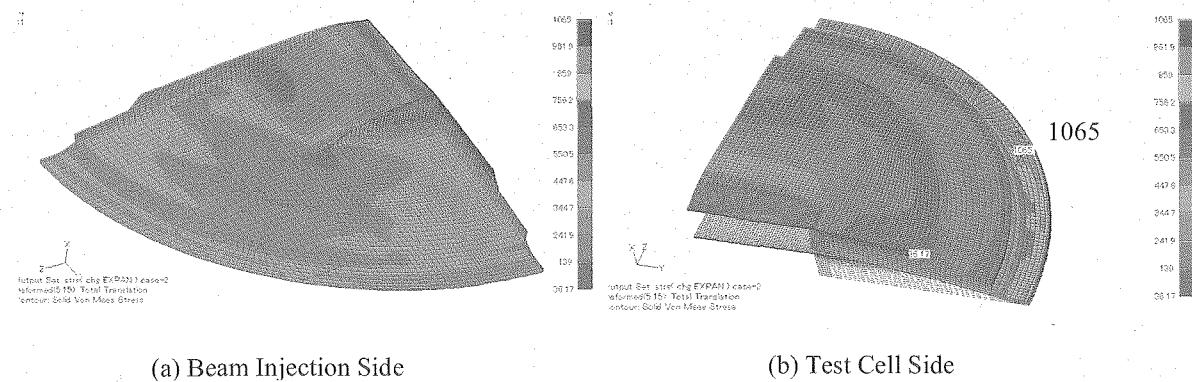
最大変位X成分が正の値は、テストセル側（液体 Li 流から離れる方向）への変位を示し、負の値は、液体 Li 流側への変位を表す。

Table 3.3-2 von Mises stress and deflection of the backwall in case of fully rigid and rotation rigid constraint conditions

輻射境界 温度	端部拘束 条件	最大応力 (MPa)	コーナ部応力 (MPa)	最大変位 (mm)		
				X成分	Y成分	Z成分
50°C	完全拘束	1003 端部	791.8	+4.9	0.54	0.54
50°C	回転拘束	485.5 中心部	457.5	-2.0	0.63	0.72
150°C	完全拘束	1065 端部	830.6	+5.2	0.57	0.56
150°C	回転拘束	504.7 中心部	493.2	-2.2	0.67	0.76

端部完全拘束の場合、最大応力は、リップシール端部で発生し、1000MPa を超える。コーナー部の応力は、800 MPa 前後である。また、外縁部が拘束されているため、ターゲット部はX方向に、変形せざるを得ない状態となり、Fig. 3.3-6 および Fig. 3.3-7 のような変形モードである。最大変位(X 成分)は、背面壁中心部で+4.9mm であり、テストセル側(液体 Li 流から離れる方向)に曲面背面壁が変位する。一方、回転拘束の場合は、上下方向(X 方向)拘束し、径方向と周方向には熱膨張を許容した条件となっており、最大応力は平面壁中心部で発生し、500MPa 前後に低下した。コーナー部応力は、同程度である。変形モードは、Fig. 3.3-9 および Fig. 3.3-10 に示すように、背面壁中心部(最小厚さ 1.8mm)の部分が、板厚の厚い周辺部が伸びることにより、引張りを受け、中立軸が不連続となることから、液体 Li 流側(ビーム入射面側)に変形するモードとなっている。最大変位(X 成分)は、背面壁中心部で約 2mm である。

端部完全拘束と端部回転拘束(並進自由)の境界条件について熱応力解析を実施したが、端部回転拘束により応力が軽減されるが、非常に厳しい応力状態にあり、熱応力を緩和する構造、また、背面壁の冷却性能を上げることにより系全体の温度を下げ、温度の均一化が図られる熱的構造とする必要がある。



(a) Beam Injection Side

(b) Test Cell Side

Fig.3.3-6 Contour of von Mises Stress Distribution
(Fully rigid constraint at the lip seal, Temperature of test cell : 150°C)

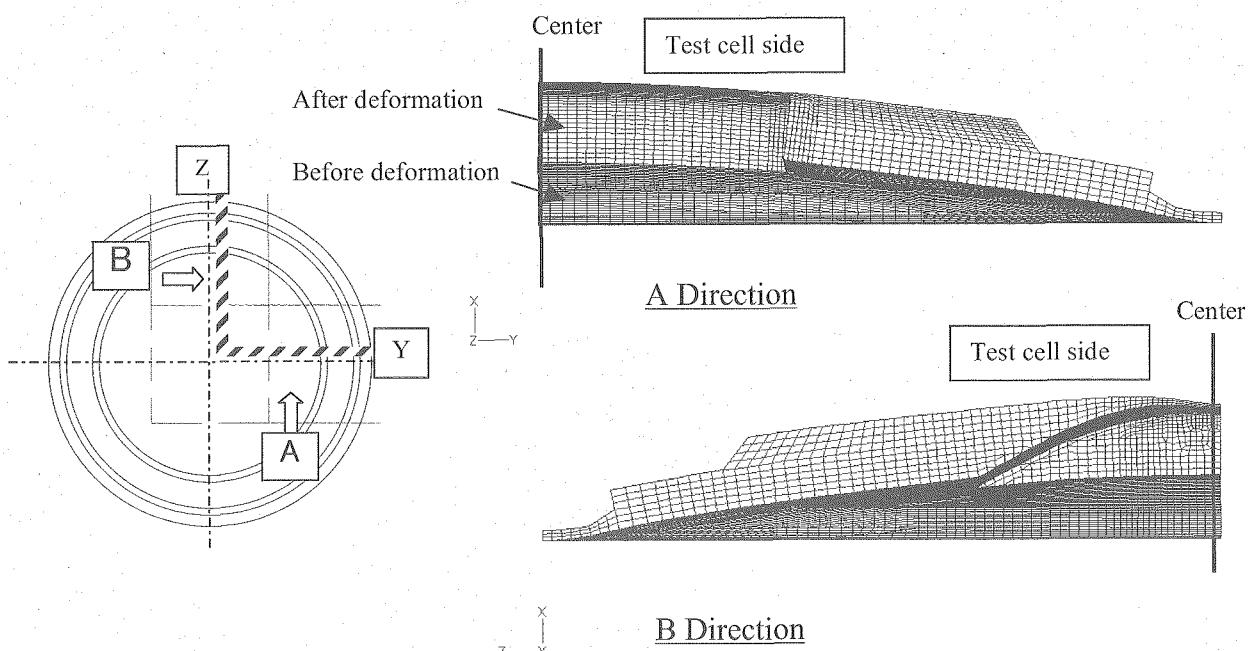


Fig.3.3-7 Cross-section of Backwall Deflection
(Fully rigid constraint at the lip seal, Temperature of test cell : 150°C)

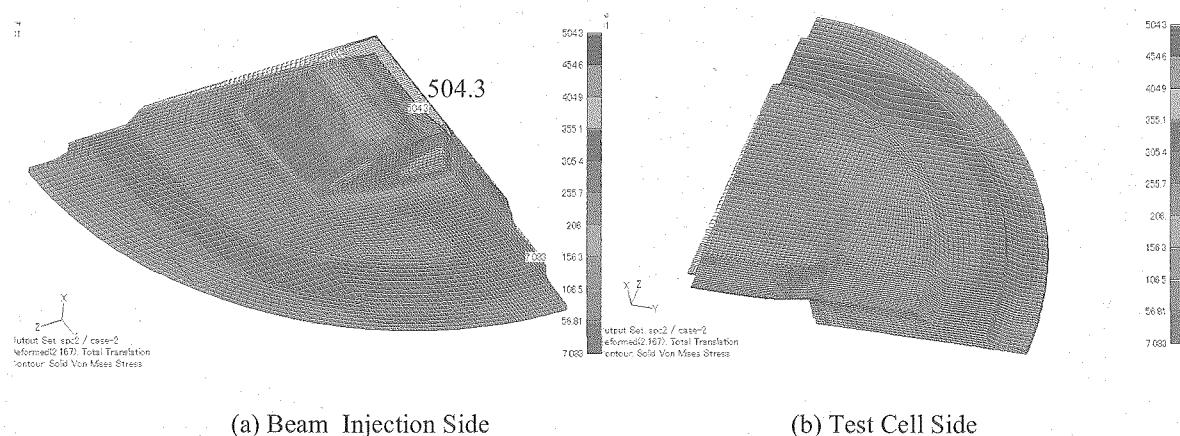


Fig.3.3-8 Contour of von Mises Stress Distribution
(Rotation rigid constraint at the lip seal, Temperature of test cell : 150°C)

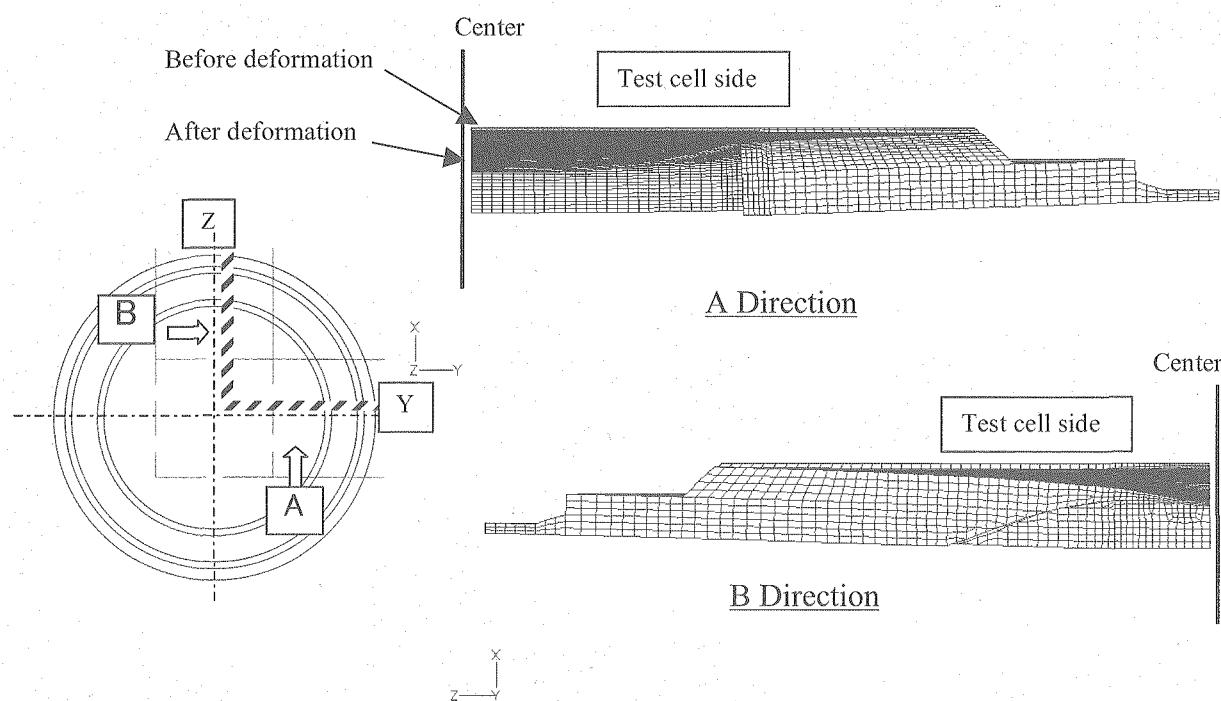


Fig.3.3-9 Cross-section of Backwall Deflection
(Rotation rigid constraint at the lip seal, Temperature of test cell : 150°C)

ii) 接触熱伝達率依存性

背面壁とターゲットアセンブリの標準条件として、押し付け圧力 0.1MPa (1 気圧) での、接触熱伝達率を $15.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ として、熱応力の接触熱伝達率依存性を評価した。ここでは、今後の背面壁取り付け方法検討の指針とするため、押し付け圧力が 0.5MPa (5 気圧) および 1MPa (10 気圧) での解析を行った。輻射境界温度は、結果への依存性が少ないため、 150°C とした。拘束条件は、端部完全拘束では、端部の発生応力が許容値を大きく超えるため、端部回転拘束とした。熱応力と変位の押し付け圧力依存性を、Fig. 3.3-10 および Table 3.3-3 にまとめる。接触熱伝達率が $158 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の場合の、応力分布および変位を、Fig. 3.3-11 および Fig. 3.3-12 に示す。最大変位の X 成分は、いずれも負の値であり、液体 Li 流側に変位している。最大応力や最大変位は、接触熱伝達率が大きくなるにつれて低下する傾向にあり、背面壁の押し付け圧力の向上は、応力および変位の抑制の有効な手段である。

Table 3.3-3 von Mises stress and deflection of the backwall in case of different contact thermal transfer rate

接触熱伝達率 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	最大応力 (MPa)	コーナ部 応力 (MPa)	最大変位 (mm)		
			X 成分	Y 成分	Z 成分
15.8	504.7 中心部	493.2	-2.2	0.67	0.76
79	343.3 中心部	318.7	-2.0	0.63	0.72
158	268.8 中心部	268.8	-0.33	0.25	-0.002

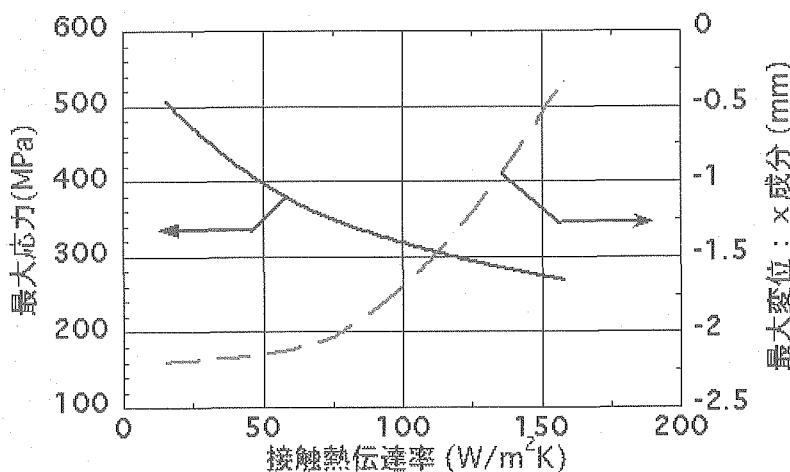


Fig. 3.3-10 Effect of contact thermal transfer rate on von Mises stress and deflection of the backwall made of SUS316L in case of rotation rigid constraint condition

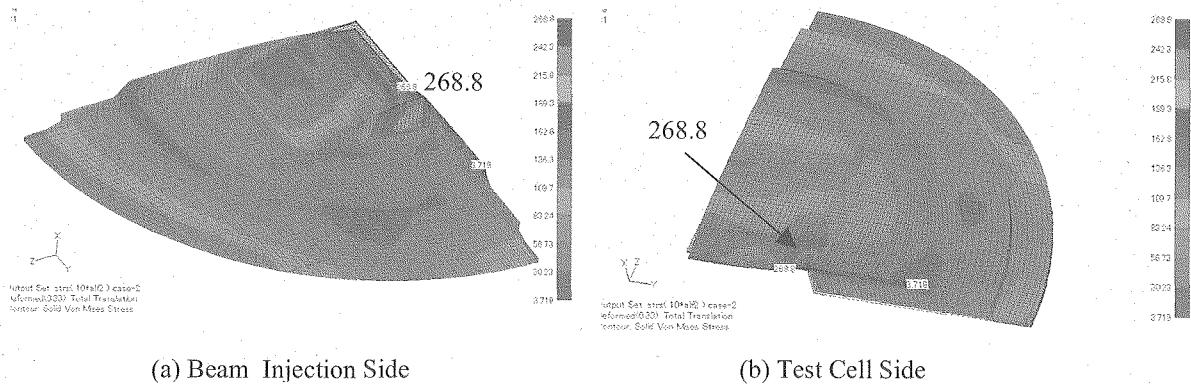


Fig.3.3-11 Contour of von Mises Stress Distribution
(Rotation rigid constraint at the lip seal, Temperature of test cell : 150°C,
Contact Thermal Transfer Coefficient: 158 W/(m² · K))

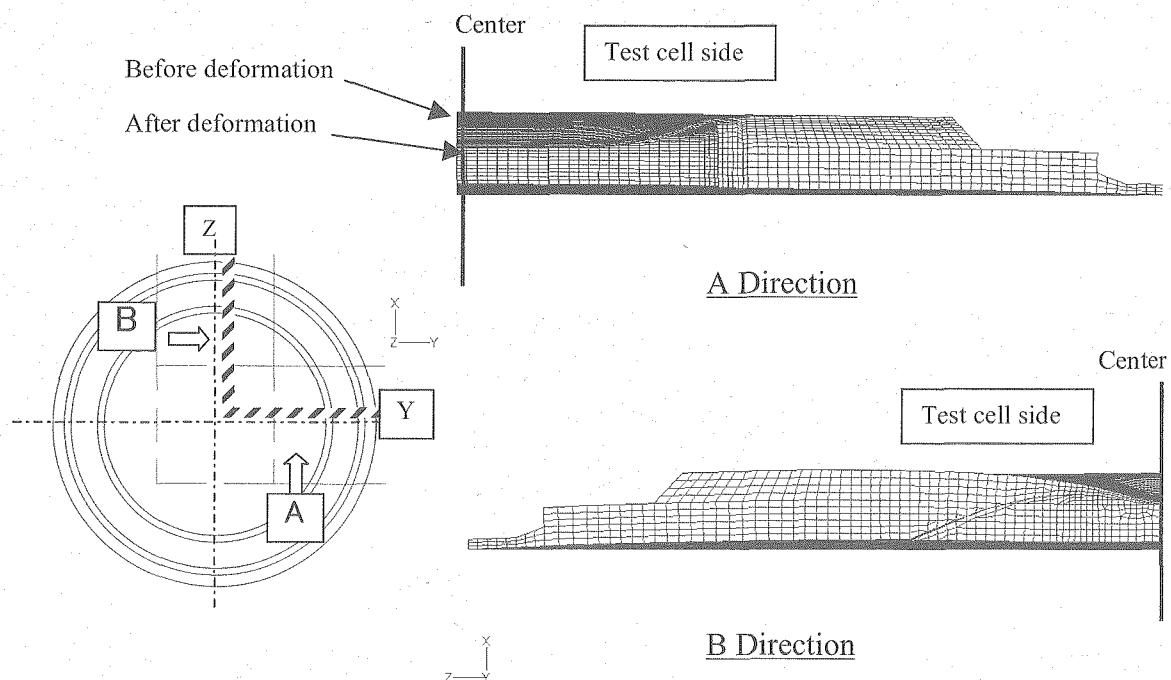


Fig.3.3-12 Cross-section of Backwall Deflection
(Rotation rigid constraint at the lip seal, Temperature of test cell : 150°C,
Contact Thermal Transfer Coefficient: 158 W/(m² · K))

iii) 背面壁厚さ依存性

標準条件では、背面壁中心部の最も薄い部分は、1.8mm である。前述の結果に基づき、熱応力と変位の背面壁厚さ依存性を評価した。背面壁厚さは、Fig. 3.3-13 に示すように、背面壁の段差部分の最小板厚が、3mm および 5mm となるように、段差部分を全体的に厚くした。接触熱伝達率は、 $15.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ とし、拘束条件は ii) と同様に端部回転拘束とした。熱応力と変位の背面壁厚さ依存性を、Fig. 3.3-14 および Table 3.3-4 にまとめた。背面壁厚さが 5mm の場合の、応力分布および変位分布を、Fig. 3.3-15 および Fig. 3.3-16 に示す。

熱応力と変位は、背面壁の最小厚さを 1.8mm から 5mm まで変化させたとしても、応力は 5.8MPa、Li 流動に影響を与える X 成分の変位の変動は 0.5mm の範囲にあり、背面壁厚さの違いによる大きな差は見られなかった。

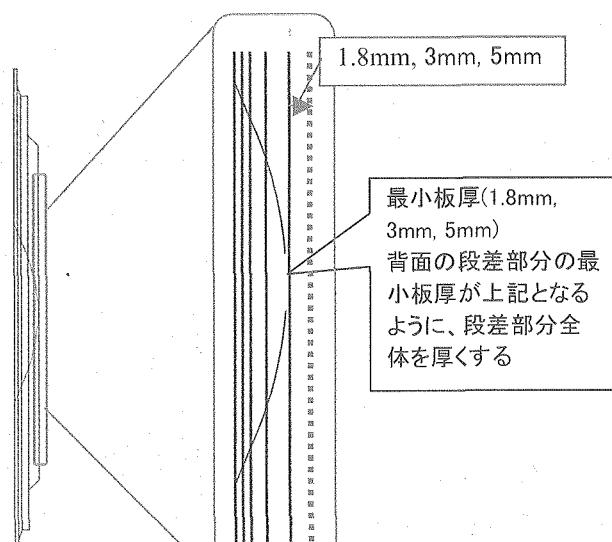


Fig.3.3-13 Model of backwall with different thickness

Table 3.3-4 von Mises stress and deflection of the backwall in case of different thickness of backwall center.

背面壁の 最小厚さ (mm)	中心部 応力 (MPa)	コーナー部 応力 (MPa)	最大変位 (mm)		
			X 成 分	Y 成 分	Z 成分
1.8	504.7	493.2	-2.2	0.67	0.76
3	427.2	490.7	-1.9	0.67	0.76
5	402.9	487.4	-1.7	0.69	0.77

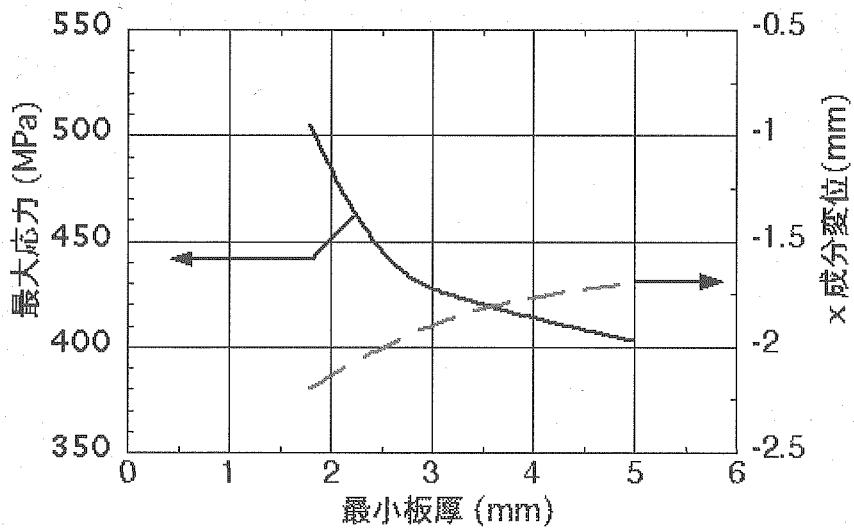


Fig. 3.3-14 Effect of minimum thickness of backwall on von Mises stress and deflection of the backwall made of SUS316L in case of rotation rigid constraint condition

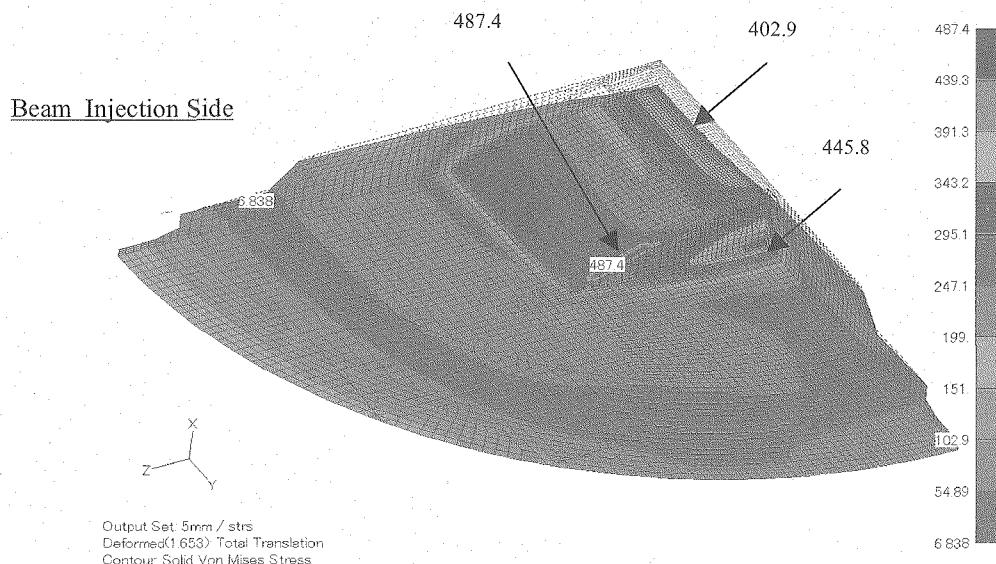


Fig.3.3-15 Contour of von Mises Stress Distribution
(Backwall minimum thickness : 5 mm, Temperature of test cell : 150°C,
Contact Thermal Transfer Coefficient: $15.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)

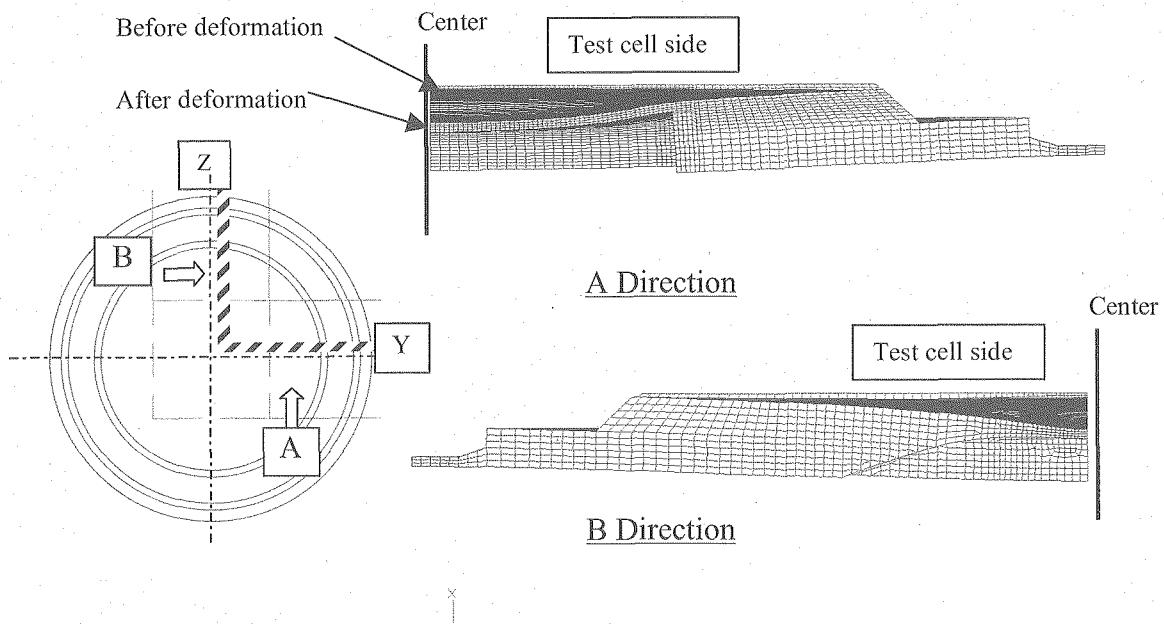


Fig.3.3-16 Cross section of backwall deflection
 (Backwall minimum thickness : 5 mm, Temperature of test cell : 150°C,
 Contact Thermal Transfer Coefficient: 15.8 W/(m² · K))

iv) まとめ

許容応力は、熱応力のような2次応力については、通常は3Sm値を適用する。しかしながら、一年あたり最大50dpaの照射損傷を受け照射硬化を生じる、背面壁の様な構造材料の許容基準は、今後の重要な検討課題である。ここでは、暫定的に、弾性範囲内の使用を想定し、許容応力は降伏応力とする。また、安全側の数値として、非照射の降伏応力値を用いる。SUS316Lの場合、300°Cでの降伏応力は、164 MPaである[16]。端部の拘束条件が回転拘束で、接触熱伝達率を押し付け圧力が1MPa(10気圧)相当の158 W/(m² · K)とした場合でも、この許容応力を超えている。そのため、背面壁の材料として、SUS316Lの使用は困難と考えられる。

3.3.3 F82H 製背面壁

SUS316L の代替の背面壁材料として、核融合炉の構造材料として有望な、低放射化フェライト鋼の F82H を検討する。解析は、拘束条件は 3.3.2 と同様に、端部完全拘束では、端部の発生応力が許容値を大きく超えるため、端部回転拘束とした。また、輻射境界温度は 150°C、背面壁の最小厚さは 1.8mm とした。接触熱伝達係数を、押し付け圧力が 0.1MPa(1 気圧)相当の 15.8 W/(m² · K)、0.5MPa(5 気圧)相当の 79 W/(m² · K) および、1 MPa(10 気圧)相当の 158W/(m² · K) の場合について、解析を行った。

(1) 温度解析

背面壁の最高温度の接触熱伝達係数に対する依存性を、Table 3.3-5 にまとめた。比較のため、SUS316L の場合の結果も記載した。また、接触熱伝達係数が 15.8 W/(m² · K) および 158W/(m² · K) の場合の温度分布を、Fig. 3.3-17 および Fig. 3.3-18 に示す。

Table 3.3-5 Maximum temperature of backwall made of F82H in different contact thermal transfer rate

接触熱伝達率 W/(m ² · K)	最高温度 (°C)	
	F82H	SUS316L
15.8	403	445
79	373	401
158	358	381

F82H の背面壁の場合、最高温度の接触熱伝達率に対する依存性は、SUS316L の場合と同様の傾向であるが、最高温度は、SUS316L に比較して、20°Cから 40°C低い。これは、F82H の熱伝導率が、SUS316L の熱伝導率約 1.6 倍であることに起因していると考えられる。

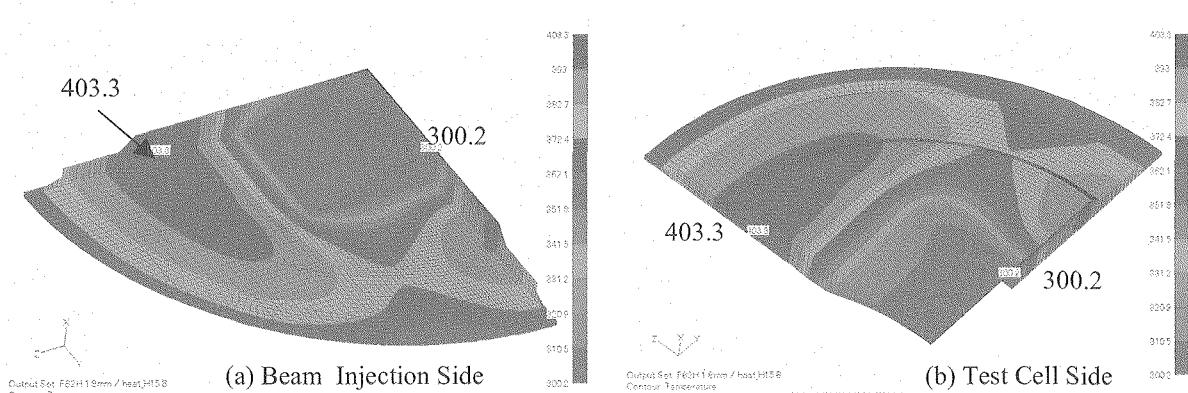


Fig.3.3-17 Contour of Temperature Distribution in F82H Backwall
(Rotation rigid constraint at the lip seal, Temperature of test cell : 150°C,
Contact Thermal Transfer Coefficient: 15.8 W/(m² · K))

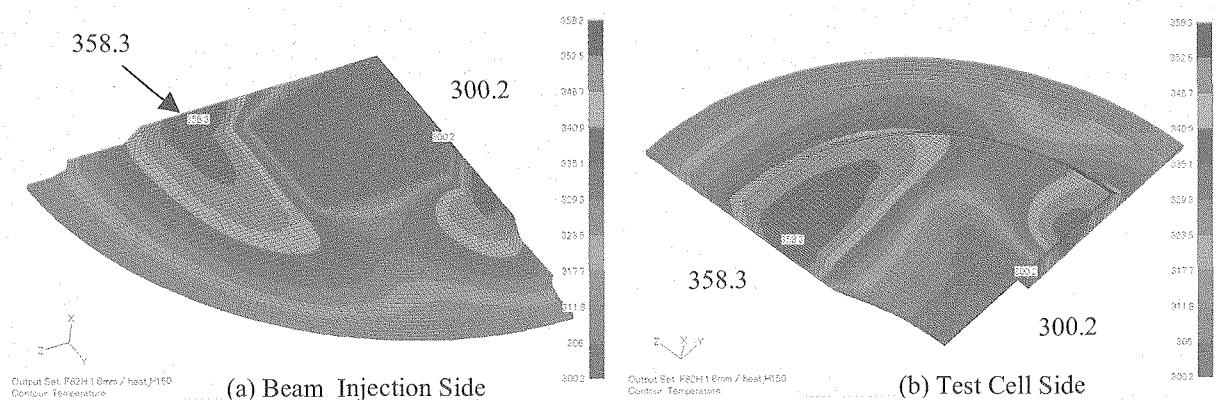


Fig.3.3-18 Contour of Temperature Distribution in F82H Backwall
(Rotation rigid constraint at the lip seal, Temperature of test cell : 150°C,
Contact Thermal Transfer Coefficient: 158 W/(m² · K))

(2) 熱応力解析

背面壁の熱応力および変位の接触熱伝達率に対する依存性を、Table 3.3-6 および Fig. 3.3-19 にまとめた。接触熱伝達係数が 15.8 W/(m² · K) の場合の応力分布および変位を、Fig. 3.3-20 および Fig. 3.3-21 に、また、接触熱伝達係数が 158 W/(m² · K) の場合の応力分布および変位を、Fig. 3.3-22 から Fig. 3.3-23 に示す。

Table 3.3-6 von Mises stress of backwall made of F82H
in different contact thermal transfer rate

接触熱伝達率 W/(m ² · K)	中心部応力 (MPa)	コーナー部 応力(MPa)	最大変位 (mm)		
			X成分	Y成分	Z成分
15.8	289	317	-1.16	0.34	0.40
79	195	180	-0.56	0.20	0.22
158	153	141	-0.30	0.13	0.15

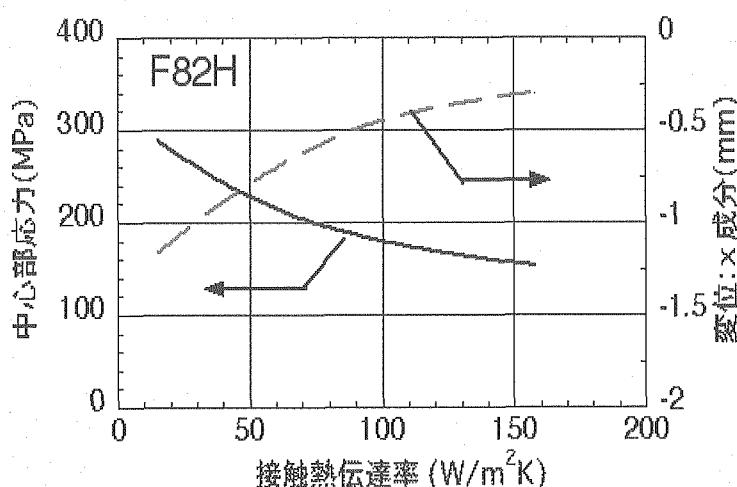


Fig. 3.3-19 Effect of minimum thickness of backwall on von Mises stress and deflection of the backwall made of F82H in case of rotation rigid constraint condition

F82H の最大応力の接触熱伝達率に対する依存性は、SUS316L の場合と同様であるが、応力値は SUS316L の場合の約 60%に低減した。変位 (X 成分) は、SUS316L の場合の 50%から 80% と大きく低減した。SUS316L の場合と同様に、許容応力を非照射材の 300°C の降伏応力とすれば、F82H の場合の許容応力は、445MPa となる[15]。接触熱伝達率が 15.8 W/(m² · K) の場合でも、許容応力を満たしている。しかしながら、Li 流動に影響を与える X 成分の最大変位が、0.3 mm から 1.16mm であり、今後、Li 流動への影響を評価し、許容される最大変位を決める必要がある。

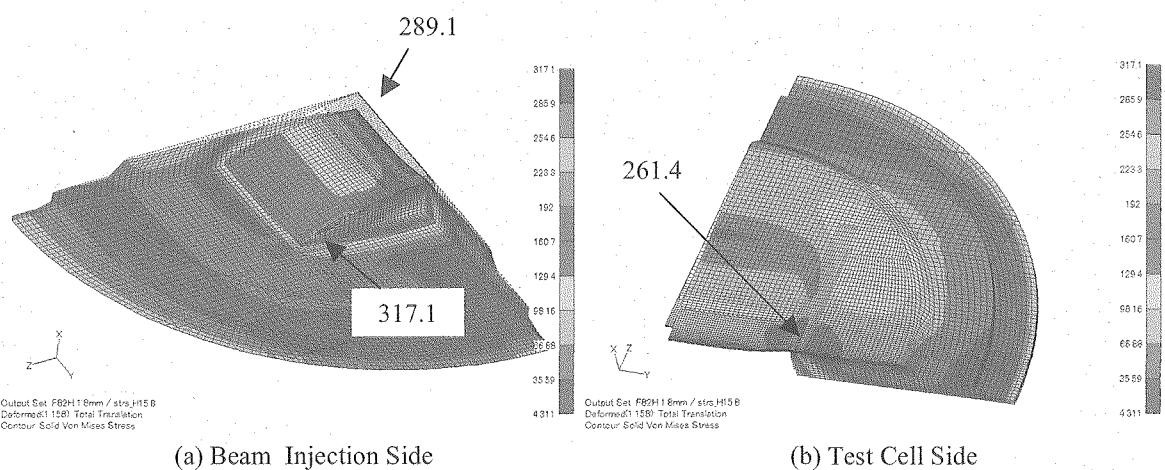


Fig.3.3-20 Contour of von Mises Distribution in F82H Backwall
(Rotation rigid constraint at the lip seal, Temperature of test cell : 150°C, Contact Thermal Transfer Coefficient: 15.8 W/(m² · K))

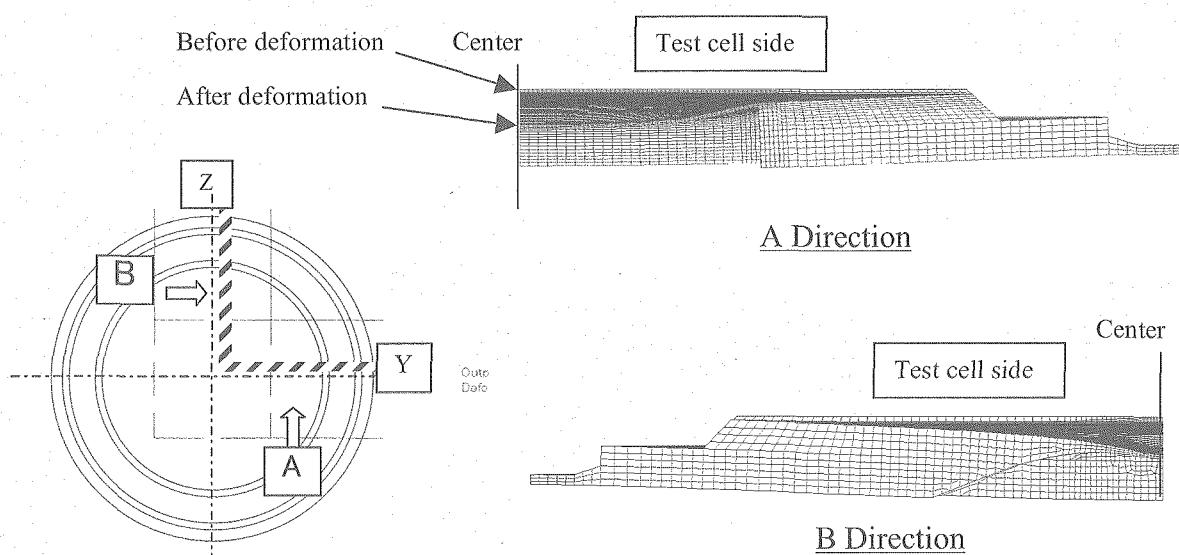


Fig.3.3-21 Cross section of backwall deflection of F82H Backwall
(Rotation rigid constraint at the lip seal, Temperature of test cell : 150°C,
Contact Thermal Transfer Coefficient: 15.8 W/(m² · K))

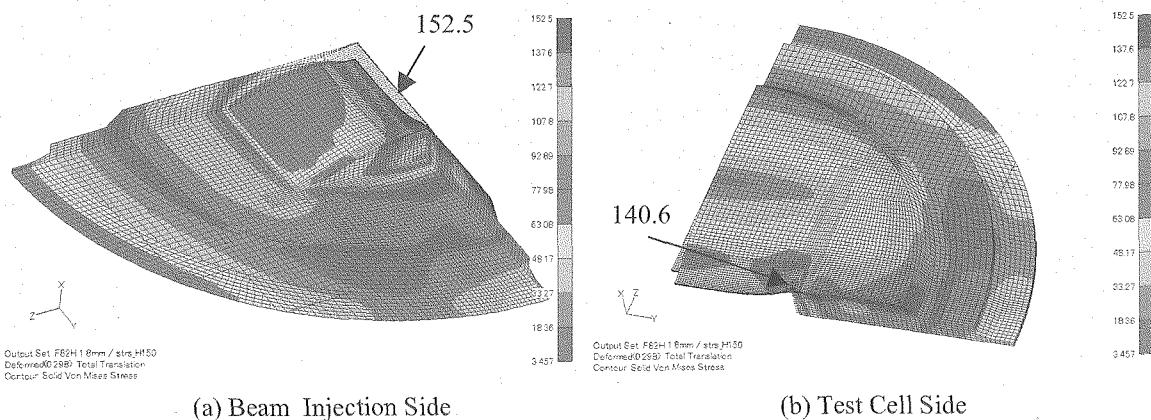


Fig.3.3-22 Contour of von Mises Distribution in F82H Backwall
(Rotation rigid constraint at the lip seal, Temperature of test cell : 150°C,
Contact Thermal Transfer Coefficient: 158 W/(m² · K))

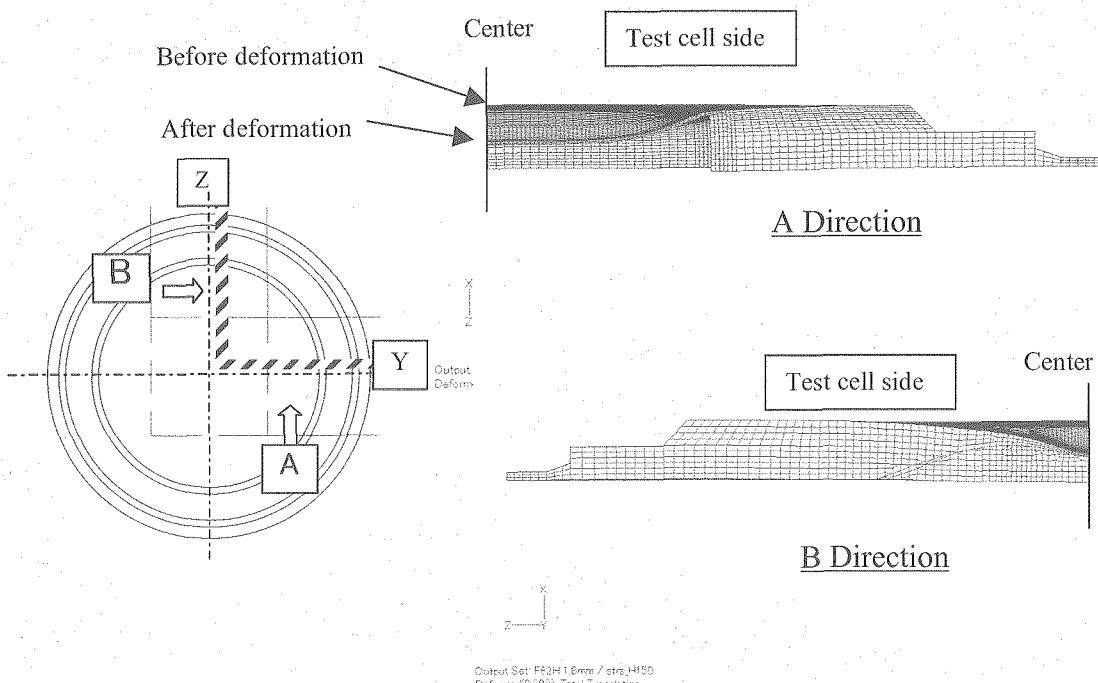


Fig.3.3-23 Cross section of backwall deflection of F82H Backwall
(Rotation rigid constraint at the lip seal, Temperature of test cell : 150°C,
Contact Thermal Transfer Coefficient: 158 W/(m² · K))

4. まとめ

国際核融合材料照射施設(IFMIF)において、1年あたり 50dpa と最も厳しい中性子照射条件であり、遠隔交換が想定されている、液体リチウムターゲットの背面壁について、汎用熱構造解析コード ABAQUS を用いて実施した熱構造解析により、以下の結果を得た。

- (1) SUS316L 材の背面壁について、テストセル容器の外表面温度が 50°C と 150°C の場合の温度解析を行った結果、輻射境界温度は背面壁の温度に大きく影響しない。
- (2) 接触熱伝達率を、押し付け圧力 0.1MPa 相当の $15.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ から 1MPa 相当の $158 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の増加した場合、背面壁最高温度は約 380°C であり、約 60°C 低下した。
- (3) SUS316L 材のリップシール端部の拘束条件を、完全拘束にした場合、熱応力は 1000MPa を超えるが、回転拘束（並進自由）条件の場合、約 500MPa に低減する。
- (4) SUS316L の許容応力は、非照射材の 300°C の降伏応力とした場合、145MPa である。端部が回転拘束で、接触熱伝達率を $158 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ とした場合でも、この許容応力を超えており、背面壁の材料として、SUS316L の使用は困難と考えられる。
- (5) F82H の背面壁の場合、最高温度の接触熱伝達率に対する依存性は、SUS316L の場合と同様の傾向であるが、最高温度は、SUS316L に比較して、20°C から 40°C 低い。
- (6) F82H の最大応力の接触熱伝達率に対する依存性は、SUS316L の場合と同様であるが、応力値は SUS316L の場合の約 60% に低減した。Li 流動特性に影響を与える、流れに垂直方向の変位は、SUS316L の場合の 50% から 80% と大きく低減した。
- (7) F82H の許容応力は、SUS316L と同様に定義すれば、455MPa となる。熱応力は、接触熱伝達率が $15.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の場合でも、許容応力を満たしており、背面壁の材料として、F82H は有力な候補材料である。

今後、ターゲットアセンブリ本体や背面壁クランプ構造等を模擬した背面壁モデルでの熱構造解析、背面壁変位の Li 流動への影響評価および熱応力や変位をさらに低減させるための構造の改良検討等を行い、安全で健全性の高い背面壁設計に役立てる必要がある。

謝辞

本研究を実施するにあたり、ご指導頂きました高津英幸核融合エネルギー工学研究開発ユニット長、西谷健夫研究主席に感謝いたします。また、原稿作成に当たり、貴重なご意見を頂きました江里幸一郎副主任研究員に感謝致します。

参考文献

- [1] IFMIF-CDA Team (Ed.) M.Martone, Final Report, ENEA Frascati Report, RT/ERG/FUS/96/17 (1996).
- [2] Shannon,T.E., Jameson,R.A., Katsuta, H., et al., J.Nucl.Mater., **258-263**, 106 (1998).
- [3] Takeuchi, H., Sugimoto, M., Nakamura, H., et al., Proc. 18th Fusion Energy Conference, Italy, October 2000, IAEA-CN-77/FTP2/03.
- [4] IFMIF international team (Ed.) H.Nakamura, et al., JAERI-Report, JAERI-Tech 2003-005, March 2003.
- [5] Moeslang,A., Fischer,U., Heizel,V., et al., "Recent Advances at the International Fusion Materials Irradiation Facility IFMIF", 19th Fusion Energy Conference, Lyon, Oct.2002, IAEA-CN-94/FT/1-2.
- [6] Nakamura, H., Riccardi, B., Ara, K., et al., "Latest liquid lithium target design during the key element technology phase in the international fusion materials irradiation facility (IFMIF)", Fusion Eng. and Des. **66-68**, 193(2003).
- [7] Nakamura, H., Riccardi, B., Loginov, N., et al., "Present Status of the liquid lithium target facility in the international fusion materials irradiation facility (IFMIF)", J.Nucl.Maters. **329-333**, 202 (2004).
- [8] Nakamura, H., Ito, K., Kukita, Y., et al., "Water Experiment of High-speed, Free-surface, Plane Jet along Concave Wall", Proceedings of the Eighth International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-8), Kyoto, Japan, September 30-October 4, (1997) 1268-1275.
- [9] Ida, M., Nakamura, Hideo, Nakamura, Hiroshi, et al., "Thermal-hydraulic Characteristics of IFMIF Liquid Lithium Target", Fusion Eng. and Des. **63-64**, 333(2002).
- [10] M.Ida, H.Nakamura, K.Shimizu, T.Yamamura, "Thermal and Thermal-stress Analyses of IFMIF Liquid Lithium Target Assembly", Fusion Eng. and Des. **75-79**, 847(2005).
- [11] Hibbitt, Karlsson&Sorensen Inc., ABAQUS User's Manual.
- [12] IFMIF-CDA Team, Minutes of Second IFMIF-CDA Design Integration Workshop, May 20-25, 1996, JAERI, Tokai, Japan, JAERI-Report, JAERI-Conf. 96-012, 1996, pp.288-290.
- [13] Uda, N., Miyazawa, A., Inoue, S. , et al., "Forced convection heat transfer and temperature fluctuations of lithium under transverse magnetic fields", J.Nucl.Sci.Technol. **38**, 936(2001).
- [14] JSME Data Book, "Heat transfer"(4th Edition), The Japan Society of Mechanical Engineers.
- [15] Tavassoli, A.-A.F., Rensman, J.-W., Schirra, M., et al., "Materials design data for reduced activation martensitic steel type F82H", Fusion Eng. and Des. **61-62**, 617 (2002).
- [16] ITER Material Hand Book (ed. V.Barabash).

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	立方メートル	m^3
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	メートル毎秒	m^{-1}
密度(質量密度)	キログラム每立法メートル	kg/m^3
質量体積(比体積)	立法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
物界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量)濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率(数の)	1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{44}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エク	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	p
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}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表される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
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1}=1^{(b)}$
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2}=1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
圧力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	ジユール	J	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
功率、放射束	ワット	W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷、電気量	クーロン	C	$s \cdot A$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	フアラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	スージメンス	S	A/V
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリイー	H	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	$cd \cdot sr^{(c)}$
光束度	ルクス	lx	lm/m^2
(放射性核種の)放射能吸収線量、質量エネルギー	ベクレル	Bq	J/kg
ギーケーパー一分与、カーマ	レイ	Gy	$m^2 \cdot s^{-2}$
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	Sv	J/kg
			$m^2 \cdot s^{-2}$

(a)ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b)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“1”は明示されない。

(c)測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d)この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含む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	$Pa \cdot s$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
表面張力	ニュートンメートル	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s^2	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^3 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	$J/(kg \cdot K)$	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エンントロピー	毎ケルビン		
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	$W/(m \cdot K)$	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	フアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエンントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	$J/(mol \cdot K)$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	ビン		
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 \cdot sr)$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3}$

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{44}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エク	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	p
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}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

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=86400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) rad$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) rad$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) rad$
リットル	L	$1L=1 dm^3=10^{-3} m^3$
トン	t	$1t=10^3 kg$
ネーベル	Np	$1Np=1$
ベル	B	$1B=(1/2) ln10(Np)$

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない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 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.6021773(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	$1a=1 dm^2=10^2 m^2$
ヘクタール	ha	$1ha=1 hm^2=10^4 m^2$
バール	bar	$1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10^5 Pa$
オングストローム	Å	$1 Å=0.1nm=10^{-10} m$
バーン	b	$1 b=100fm^2=10^{-28} m^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7} J$
ダイナ	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボアズ	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1Pa \cdot s$
ストップス	St	$1 St = 1cm^2/s=10^{-4} m^2/s$
ガウス	G	$1 G=10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe=(1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=10^{-8} Wb$
チルブ	sb	$1 sb=1cd/cm^2=10^4 cd/m^2$
ホル	ph	$1 ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1cm/s^2=10^{-2} m/s^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レンタゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1cGy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位	$1X unit=1.002 \times 10^{-4} nm$	
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 nT=10^{-9} T$
ジャンスキール	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fermi	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット		$1 metric carat = 200 mg = 2 \times 10^{-4} kg$
トル	Torr	$1 Torr = (101.325/760) Pa$
標準大気圧	atm	$1 atm = 101.325 Pa$
カリヨリ	cal	
ミクロ	μ	$1 \mu=1 \mu m=10^{-6} m$