



JAEA-Technology

2006-003



JP0650284

JAEA-Technology

## IFMIF ターゲットアセンブリの熱解析

Thermal Analysis of IFMIF Target Assembly

井田 瑞穂 中村 博雄  
山村 外志夫\* 杉本 昌義

Mizuho IDA, Hiroo NAKAMURA,  
Toshio YAMAMURA\* and Masayoshi SUGIMOTO

核融合研究開発部門  
核融合炉材料開発グループ

Fusion Materials Development Group  
Fusion Research and Development Directorate

February 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に刊行している研究開発報告書です。  
本レポートの全部または一部を複写・複製・転載する場合は下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

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

Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

This report was issued subject to the copyright of Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about the copyright and reproduction should be addressed to :

Intellectual Resources Section,

Intellectual Resources Department

2-4, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, JAPAN

Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

©日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency, 2006

IFMIF ターゲットアセンブリの熱解析

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  
井田 瑞穂・中村 博雄・山村 外志夫\*・杉本 昌義

(2006年1月11日受理)

国際核融合材料照射施設(IFMIF)ターゲット系ループでは、ビーム入射時の沸騰を防止するため液体リチウムは 250°C 程度の低温で循環される。しかしながら、それに先立つ装荷時に液体リチウムが凝固しないようにターゲットアセンブリの温度を 200°C 程度以上に維持することが必要である。このターゲットアセンブリが設置されるテストセル室の条件としては真空、アルゴンまたはヘリウム雰囲気が考えられている。また、ターゲットアセンブリの背面壁はリチウム融点(180°C)より低い外壁温度を有する垂直型テストアセンブリに近接している。そこで、このような条件下で要求されるターゲットアセンブリ保温構造仕様を定めるための熱解析を行った。その結果、セラミックファイバー製の保温層よりもステンレス鋼製の熱遮蔽体のほうがコンパクトであること、真空条件ではその輻射率を 0.05 以下にすることにより熱遮蔽板の数は 5 枚で十分であることが明らかになった。また、保温構造体が施工できない背面壁の場合、真空条件では機器の輻射率を 0.1 以下にすること、およびヘリウム条件では背面壁に 9kW のヒーターを取り付けることによって要求を満たすことを明らかにした。

Thermal Analysis of IFMIF Target Assembly

Mizuho IDA, Hiroo NAKAMURA, Toshio YAMAMURA\* and Masayoshi SUGIMOTO

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

(Received January 11, 2006)

In the International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF), liquid lithium is circulated in the loop under a rather low temperature condition about 250°C to avoid lithium boiling at an injection of deuteron beams. However, maintaining a temperature of a target assembly at about 200°C or more so as to avoid a freezing of liquid lithium is needed at the lithium charge into the loop before the beam injection. Condition in a test cell room where the target assembly is installed is considered to be vacuum, filled with argon or helium gas. Furthermore, a back-wall of the target assembly is close to a vertical test assembly with an outside temperature less than a lithium melting point 180°C. Therefore, specifications of the target assembly needed under these conditions were examined through thermal analyses. The result showed that a thermal shield made of stainless steel plates was better than a thermal insulation made of ceramic fiber from viewpoint of needed volume, and that a thermal shield consisting of five plates with an emissivity less than 0.05 was sufficient under the vacuum condition. Through an analysis for the back-wall where a thermal insulation/shield can not be attached, the result showed that component with an emissivity less than 0.1 and a back-wall heater of 9 kW sufficiently maintain the thermal condition in case of vacuum and helium conditions, respectively.

Keywords : IFMIF, Target Assembly, Thermal Analysis, Thermal Shield, Emissivity

---

\* Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

## 目次

1.はじめに .....	1
2. ターゲットアセンブリ保温構造の熱解析 .....	5
2.1 検討条件 .....	5
2.1.1 計算モデル .....	5
2.1.2 物性値 .....	8
2.1.3 検討ケース .....	8
2.2 計算方法 .....	9
2.2.1 基本的方法 .....	9
2.2.2 記号説明 .....	9
2.2.3 保温層モデルの熱計算方法 .....	11
2.2.4 热遮蔽体モデルの熱計算方法 .....	12
2.3 計算結果および考察 .....	13
2.3.1 保温層/熱遮蔽体内部温度分布 .....	13
2.3.2 保温層と熱遮蔽体との性能比較 .....	14
2.3.3 热遮蔽板輻射率の影響 .....	14
3. 背面壁およびその近傍の保温条件に関する熱解析 .....	16
3.1 検討条件 .....	16
3.1.1 計算モデル .....	16
3.1.2 物性値 .....	22
3.1.3 検討ケース .....	22
3.2 計算方法 .....	23
3.2.1 基本的方法 .....	23
3.2.2 記号説明 .....	24
3.2.3 热計算方法 .....	25
3.3 計算結果および考察 .....	27
3.3.1 温度分布の一般的傾向 .....	27
3.3.2 真空環境下での温度 .....	27
3.3.3 アルゴン環境下での温度 .....	32
3.3.4 ヘリウム環境下での温度 .....	32
3.3.5 背面壁へのヒーター施工 .....	36

4. 加熱ヒーター容量の評価	39
4.1 検討条件	39
4.1.1 検討対象	39
4.1.2 温度条件	40
4.1.3 物性値	40
4.1.4 検討ケース	40
4.2 計算方法	41
4.2.1 記号説明	41
4.2.2 ヒーター容量計算方法	41
4.3 計算結果および考察	42
4.3.1 真空条件でのヒーター容量	42
4.3.2 Ar 条件でのヒーター容量	42
4.3.3 He 条件でのヒーター容量	42
5. まとめおよび今後の課題	43
5.1 まとめ	43
5.1.1 ターゲットアセンブリ保温構造	43
5.1.2 背面壁およびその近傍の保温条件	43
5.1.3 加熱ヒーター容量	44
5.2 今後の課題	44
参考文献	44
付録	45

**Contents**

1. Introduction .....	1
2. Thermal Analysis for Structure of Thermal Insulation around Target Assembly ..	5
2.1 Calculation Condition .....	5
2.1.1 Calculation Model .....	5
2.1.2 Thermal Properties .....	8
2.1.3 Calculation Cases .....	8
2.2 Calculation Method .....	9
2.2.1 Fundamental .....	9
2.2.2 Nomenclature .....	9
2.2.3 Thermal Calculation Method of Thermal Insulation Model .....	11
2.2.4 Thermal Calculation Method of Thermal Shield Model .....	12
2.3 Calculation Results and Discussion .....	13
2.3.1 Temperature Distribution in Thermal Insulation/Shield .....	13
2.3.2 Comparison on Performance of Thermal Insulation/Shield .....	14
2.3.3 Effect of Emissivity of Thermal-shielding Plate .....	14
3. Thermal Analysis for Conservation of Thermal Condition of/around Back-wall ..	16
3.1 Calculation Condition .....	16
3.1.1 Calculation Model .....	16
3.1.2 Thermal Properties .....	22
3.1.3 Calculation Case .....	22
3.2 Calculation Method .....	23
3.2.1 Fundamental .....	23
3.2.2 Nomenclature .....	24
3.2.3 Thermal Calculation Method .....	25
3.3 Calculation Results and Discussion .....	27
3.3.1 General Tendency in Temperature Distribution .....	27
3.3.2 Temperature under Vacuum Condition .....	27
3.3.3 Temperature under Argon-gas Condition .....	32
3.3.4 Temperature under Helium-gas Condition .....	32
3.3.5 Heater on Back-wall .....	36

<b>4. Estimation of Heater Capacity .....</b>	<b>39</b>
4.1 Calculation Condition .....	39
4.1.1 Heated Objects .....	39
4.1.2 Thermal Condition .....	40
4.1.3 Thermal Properties .....	40
4.1.4 Calculation Cases .....	40
4.2 Calculation Method .....	41
4.2.1 Nomenclature .....	41
4.2.2 Calculation Method of Heater Capacity .....	41
4.3 Calculation Results and Discussion .....	42
4.3.1 Heater Capacity under Vacuum Condition .....	42
4.3.2 Heater Capacity under Argon-gas Condition .....	42
4.3.3 Heater Capacity under Helium-gas Condition .....	42
<b>5. Summary and Future Tasks .....</b>	<b>43</b>
5.1 Summary .....	43
5.1.1 Structure of Thermal Insulation around Target Assembly .....	43
5.1.2 Conservation of Thermal Condition of Back-wall and Its Close Parts ..	43
5.1.3 Heater Capacity .....	44
5.2 Future Tasks .....	44
<b>References .....</b>	<b>44</b>
<b>Appendices .....</b>	<b>45</b>

## 1. はじめに

国際核融合材料照射施設(IFMIF)のターゲット系の役割は、平均損傷 20 dpa/年の中性子照射に必要な核融合模擬中性子束を安定に発生させるため、エネルギー 40 MeV、電流値 250 mA の重陽子ビーム入射の標的として、高速の液体リチウム(Li)流を長時間安定かつ安全に実現することである。ターゲット系の模式図(除熱の 2 次系の有機熱媒体ループおよび 3 次系の水ループを除く)を図 1.1 に、主要な設計仕様を表 1.1 に示す。ターゲット系はターゲットアセンブリとリチウムループに大別される。10 MW の重陽子ビームによるリチウムターゲット上での平均熱負荷は 1 GW/m<sup>2</sup>にも達する。この入熱条件下でのリチウム沸騰を防止するため、循環されるリチウムの温度を 250°C 程度の低温にするとともに、ターゲットアセンブリでは 2 段絞りノズルで生成された最大流速 20 m/s の液体リチウムを凹面状の背面壁に沿って流し、遠心力により沸点が上昇した状態で除熱が行われる。このためリチウムループはターゲットアセンブリに最大流量 130 L/s でリチウムを供給するとともに、10 MW の熱を 2 次系へ伝えるシステムとなっている。

このようなターゲット系の設計の重要な課題のひとつとしてターゲットアセンブリの熱的成立性がある。熱的成立性とは、IFMIF 立ち上げ時に、重陽子ビーム入射無しの状態で、ターゲット系 1 次ループへ液体リチウムを装荷する際に液体リチウムが凝固しないようにその温度を維持すること、および、その後の IFMIF 運転中に、中性子照射により核発熱を受けている背面壁の熱応力・変位が許容できることである。

テストセル室内に設置されるターゲットアセンブリ周辺の熱的条件を図 1.2 にて模式的に示す。テストセル室は概ね 3 m × 3 m × 6 m の矩形であり、当初の設計ではその室内は IFMIF 運転中は 0.1 Pa の真空に保たれ、メンテナンス中は 1 気圧よりやや低めのアルゴンガスで満たされることになっていて、このような室内での放熱条件下で低温のリチウムが凝固しないように、ターゲットアセンブリ温度を 200°C 程度以上に維持できる仕様を明らかにする必要があった。さらにその後、大型矩形のテストセル室を耐圧 1 気圧で設計することの困難さから運転中も放射化しないヘリウムガスを 1 気圧で満たす案も浮上し、その高い熱伝導の条件下でも温度維持が要求されている。このようなターゲットアセンブリを含む 1 次ループのどの場所においてもリチウムが凝固しないようにする必要があるが、その中でも自由表面部の流路を形成する背面壁は、中性子照射実験のための垂直型テストアセンブリ(VTA、表面温度: 50–150°C) と 2±0.5 mm の距離に近接しているため保温層等の施工が困難であり、温度維持が最も難しい部分であると予想される。

本報告書はこのような条件下でのリチウム装荷時の IFMIF ターゲットアセンブリの予熱・断熱構造の概念を構築するために行った解析の検討結果をまとめたものである。2 章は、保温構造体の施工スペースが確保できるアセンブリ上流部分の保温構造体(セラミックファイバー製の保温層とステンレス鋼製の熱遮蔽体)の基本構成、放散熱量と厚みに関する熱解析であり、3 章は、保温構造体等の施工スペースが確保できない背面壁およびその周辺部分のヒーター加熱と各部温度に関する熱解析である。これら解析ではヒーター加熱、機器・要素・雰囲気内(間)の熱伝導、表面/接触熱伝達、対流、輻射の熱バランスにより解を求める。得られた結果から、4 章では、ターゲット系立ち上げ時に必要なヒーター容量を求める。5 章では、まとめと今後の課題について述べる。

表 1.1 IFMIF ターゲット系の主要な設計仕様

項目	仕様
重陽子エネルギー、ビーム電流値	40 MeV、125 mA x 2 台
平均熱負荷密度	1 GW/m <sup>2</sup>
リチウム流上のビームフットプリント	<sup>H</sup> 50 mm x <sup>W</sup> 200 mm
ビーム入射部でのリチウム流の幅、厚さ	<sup>W</sup> 260 mm x <sup>T</sup> 25 mm
ビーム入射部でのリチウム流流速	15 m/s (運転範囲: 10–20 m/s)
背面壁曲率半径	0.25 m
ビーム入射部上流でのリチウム温度	250 °C (nominal) – 300 °C
リチウム自由表面付近での真空度	10 <sup>-3</sup> Pa
機器材質 (背面壁) (その他)	SUS316L または低放射化フェライト鋼 SUS316L
機器内壁腐食損耗率 (背面壁、ノズル) (その他)	< 1 μm/年 < 50 μm/30 年
機器交換頻度 (背面壁) (その他)	11 ヶ月毎 30 年間交換しない

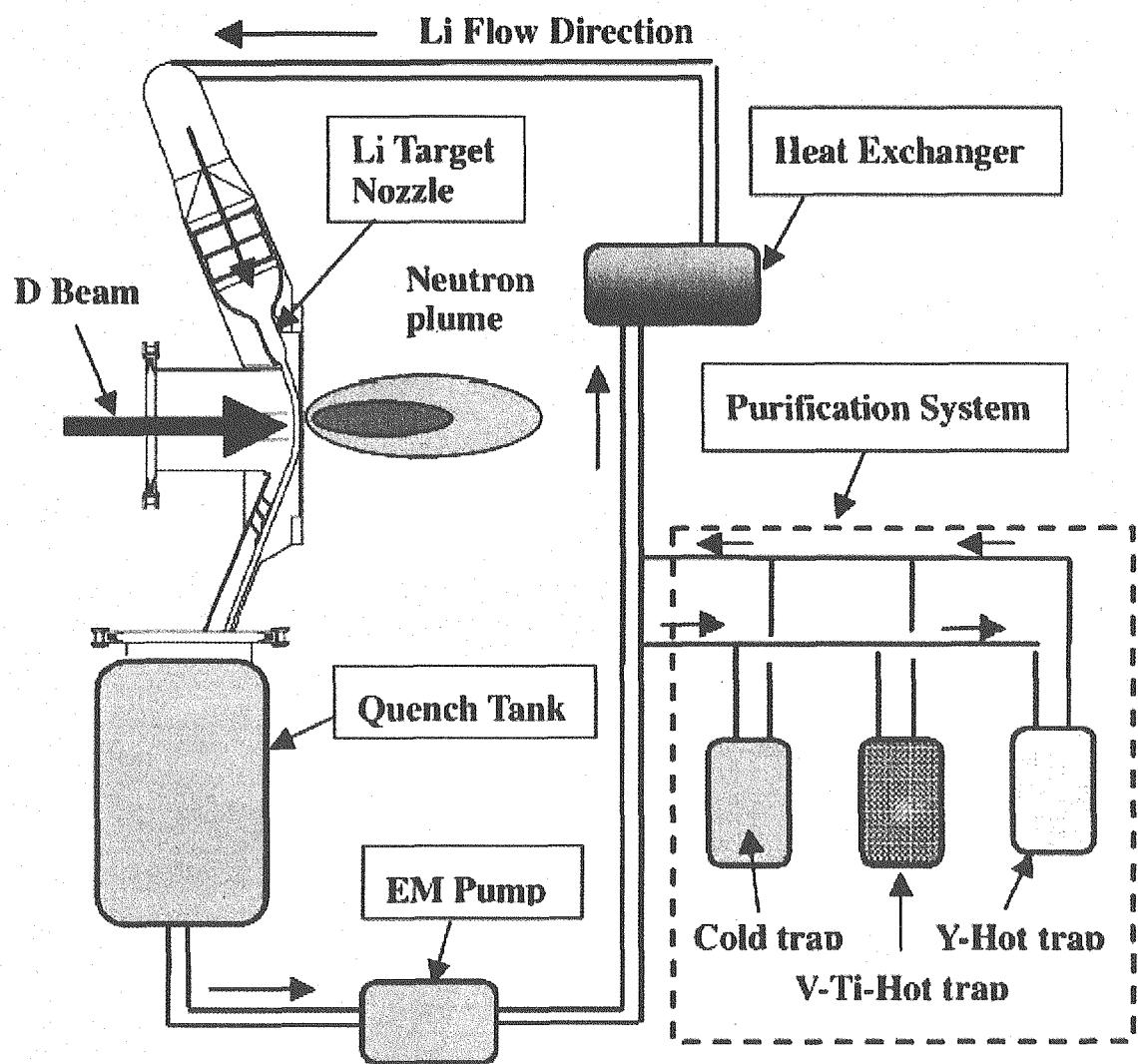


図1.1 IFMIFターゲット系主要部模式図

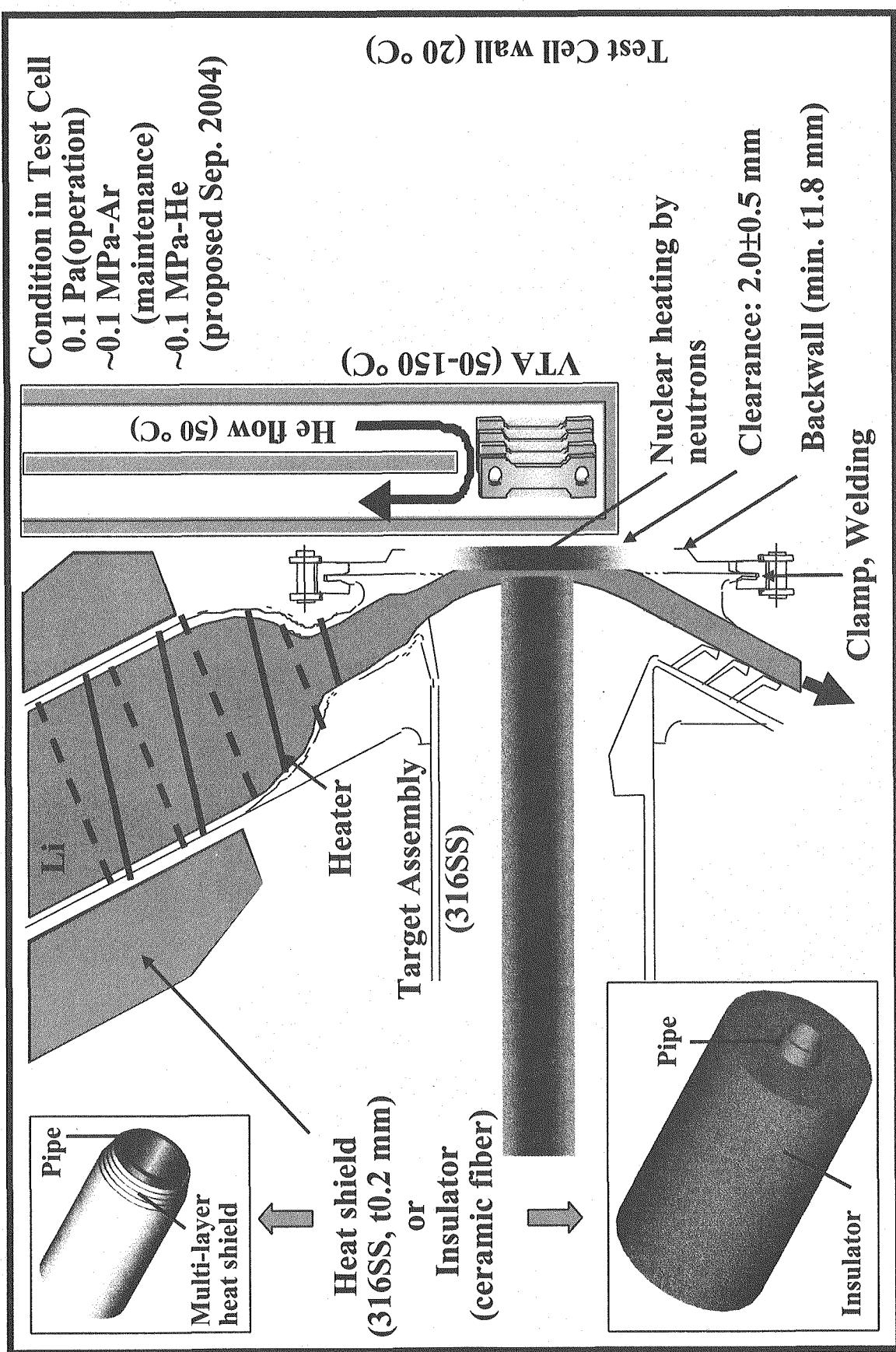


図 1.2 ターゲットアセンブリ周辺の熱的条件

## 2. ターゲットアセンブリ保温構造の熱解析

図 1.2 に示したようにターゲットアセンブリの上流部分が垂直型テストアセンブリ(VTA)との干渉を避けるように  $22.5^{\circ}$  傾いて配置されるため、二段絞りノズルより上流部分には保温構造体を取り付けるだけのスペースが存在する。ターゲットアセンブリ用の保温構造体としては、

- ・一体型構造のセラミックファイバ保温層
- ・薄いステンレス鋼板の多層熱遮蔽体

を想定し、それらの保温構造について、与えられた条件での保温層/熱遮蔽体の厚さ及び保温層/熱遮蔽体からの放散熱量の検討を行った。この検討は、ターゲットアセンブリ表面、保温層/熱遮蔽体の内部および表面、テストセル室霧囲気、VTA 表面、テストセル室壁表面の間の熱伝導、輻射、表面熱伝達、対流（後者 2 点はテストセル霧囲気のある場合のみ）の熱収支が合うように計算することをもって実施した。なお、保温層/熱遮蔽体の詳細構造は、今後の検討課題である。

### 2.1 検討条件

#### 2.1.1 計算モデル

保温層を用いた場合および熱遮蔽体を用いた場合の計算モデルをそれぞれ図 2.1 および図 2.2 に示す。詳細は以下のとおりである。

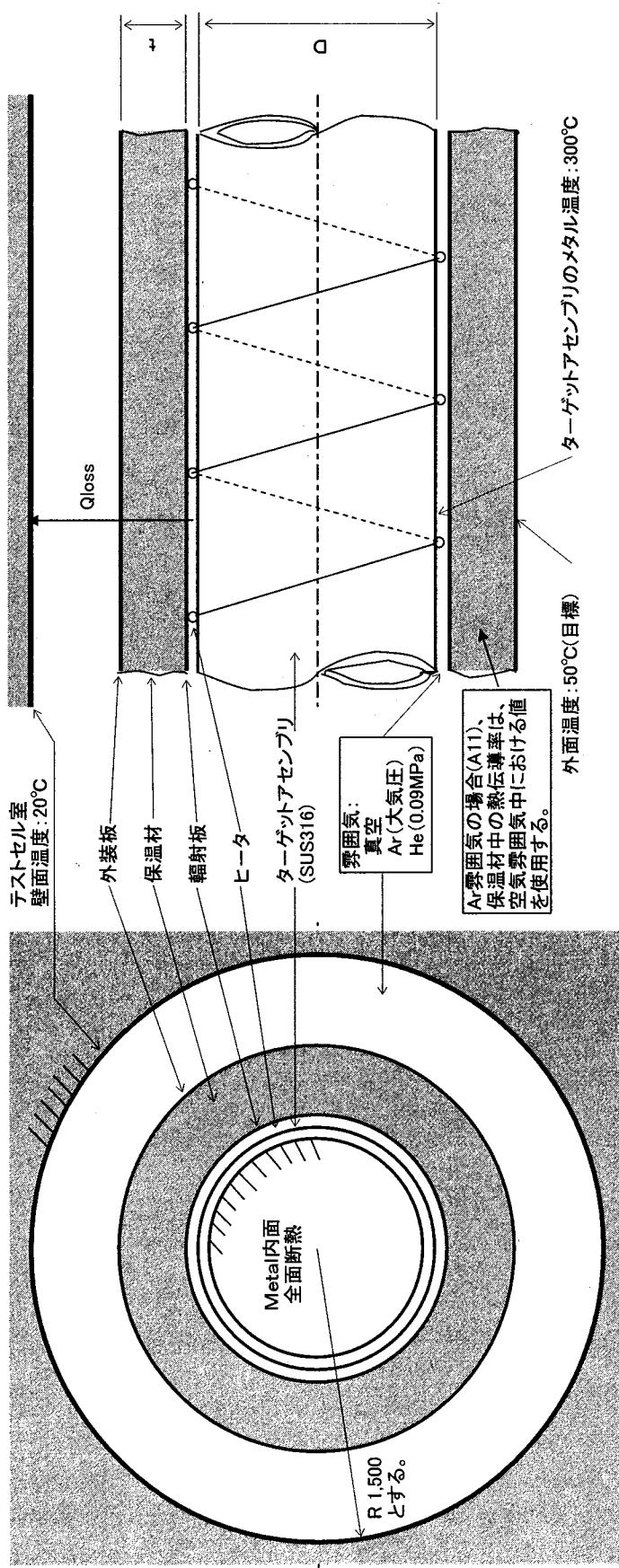
##### (1) 形状および配置

ターゲットアセンブリを円筒構造(10B 配管、外径 267.4 mm)に単純化し、保温層/熱遮蔽体、テストセル室壁（内径 1500 mm）も含めて軸対称無限長に単純化したモデルを採用した。ターゲットアセンブリ表面でのヒーター施工スペース 5 mm および余裕 5 mm を考慮し、保温層/熱遮蔽体の内側表面内径を 287.4 mm とした。熱遮蔽体は厚さ 0.2 mm のステンレス(SUS304)鋼板を 5 mm の等間隔で重ねた多層構造とした。

##### (2) 霧囲気および温度境界条件

テストセル室霧囲気としては、真空、Ar、He の 3 通りに関し検討した。このうち「真空」は実際の IFMIF 運転では 0.1 Pa であるが、本計算上は完全な真空霧囲気として扱うものとし、保温層外面からの放散熱量はふく射によるもののみとする。He 霧囲気の場合は運転中に使用されることも考慮し、圧力を 0.09 MPa とした。

IFMIF の運転中は、液体リチウムが重陽子ビームによる加熱を受け、その平均温度が温度  $250^{\circ}\text{C}$  から約  $280^{\circ}\text{C}$  まで上昇するが、本計算では余裕を見て、リチウム装荷前のターゲットアセンブリ温度を  $300^{\circ}\text{C}$ （一定温度境界条件）とした。



## 記号説明

D : ターデットアセンブリの外径  $10B$  (外径:  $\phi 267.4\text{mm}$ )とする。

t : 保温材厚さ

計算Case A-10, 11, 12

図2.1 ターデットアセンブリの保温層からの放散熱量計算モデル（円筒モデル）

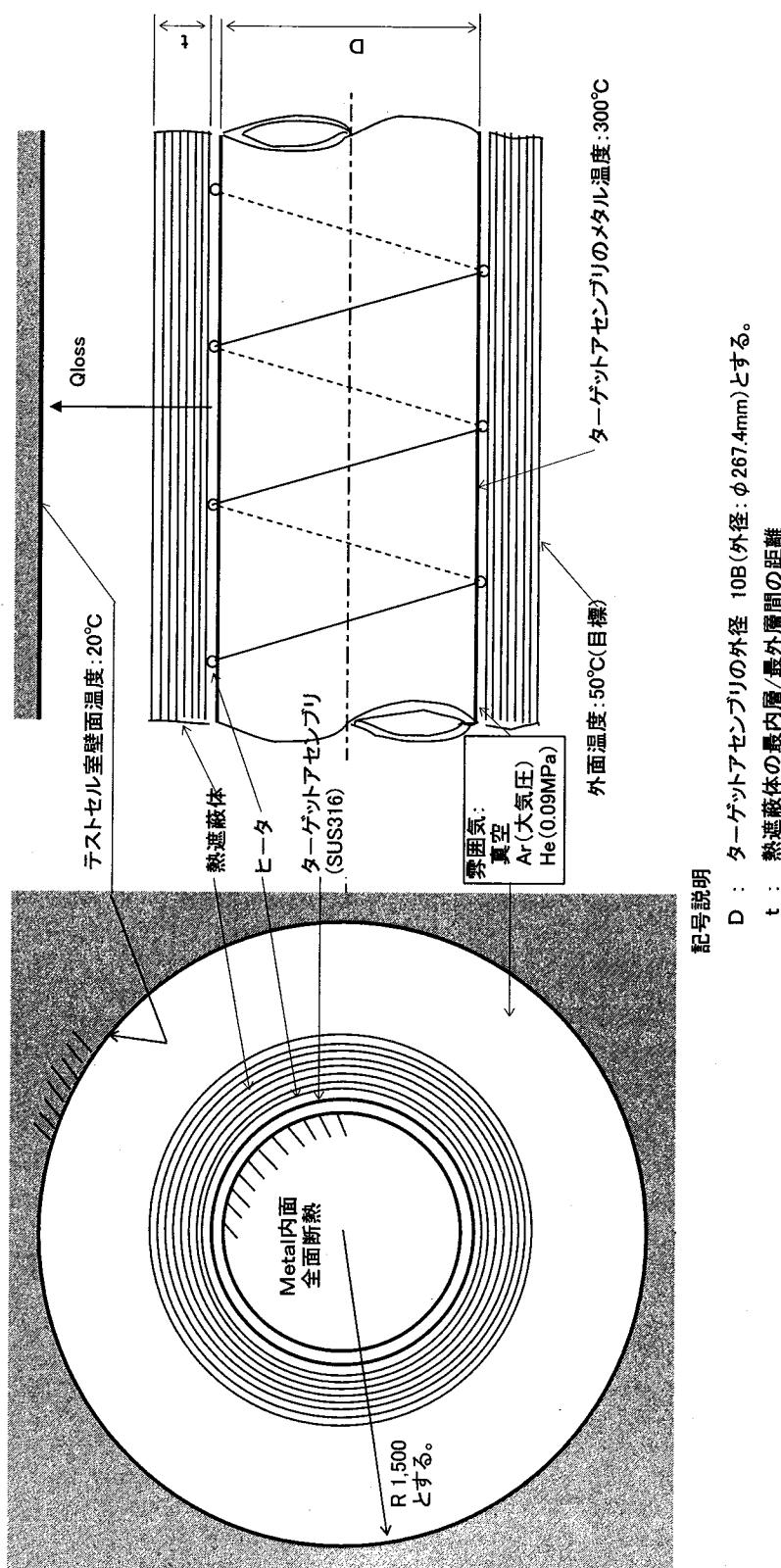


図2.2 ターゲットアセンブリの熱遮蔽体からの放散熱量計算モデル（円筒モデル）

## 2.1.2 物性値

### (1) 保温層

セラミックファイバーブランケット保温層の熱伝導率は、He 霧囲気条件では付録 2.1[2.1]に示すものとした。Ar ガス霧囲気や真空の条件ではデータがないため、全て JIS に記載の空気霧囲気中のデータを使用し、保温層平均温度  $\theta$  ( $(300+50)/2 = 175^{\circ}\text{C}$ ) の単位を $^{\circ}\text{C}$ として下式により近似した。[2.2]

$$\lambda_i = 0.065 - (3.0 \times 10^{-5}) \times \theta + (3.78 \times 10^{-7}) \times \theta^2$$

これは、Ar ガス霧囲気中及び、真空中に比べて空気霧囲気中の方が定性的に熱伝導率が高いいため、保温層厚さが大きくなる保守側の設定である。尚、真空中において熱伝導はないと考えるが、ここでは、空気霧囲気中のデータを使用した。将来、セラミックファイバーブランケット等の保温層構造に関する詳細な検討を行う場合には、必要に応じて、Ar 霧囲気中及び真空中の保温層の熱伝導率を把握するためのデータ取得が必要であると考える。

### (2) 热遮蔽体

热遮蔽体には SUS304 の磨き鋼板を用いるとして、その輻射率を 0.2 とした。その他の VTA 表面、テストセル室壁表面等の輻射率も一律 0.2 とした。ただし、热遮蔽体の輻射率の影響を見るため、一番外側の 1 枚を除く全鋼板の輻射率を低下（向上）させた追加ケースも検討した。

### (3) テストセル室霧囲気

Ar ガスおよび He ガスの物性値はそれぞれ付録 2.2[2.3]および付録 2.3[2.4]によるものとする。

## 2.1.3 検討ケース

保温構造体、テストセル室霧囲気の違いにより、表 2.1 に示すようなケースに関し検討した。

表 2.1 ターゲットアセンブリ保温構造検討ケース

ケース	保温構造体	テストセル室霧囲気
A10	保温層	真空
A11	保温層	Ar (20°C、大気圧)
A12	保温層	He (20°C、0.09 MPa)
A20	熱遮蔽体	真空
A21	熱遮蔽体	Ar (20°C、大気圧)
A22	熱遮蔽体	He (20°C、0.09 MPa)

## 2.2 計算方法

### 2.2.1 基本的方法

保温層/熱遮蔽体内部通過熱量( $Q_a$ )と保温層/熱遮蔽体外表面からの放散熱量( $Q_b$ )とを分割して熱計算を実施した。熱収支としては、通過熱量と外表面からの放散熱量は同じでなければならぬ。従って、2.1にて示した条件下において、

$$Q_a = Q_b$$

となり、かつ、

- ・保温層の外側表面温度：50°C
- ・熱遮蔽体の外側表面温度：約 50°C

の温度条件を満足できる保温層厚さ/熱遮蔽板枚数を収束計算で求めることとした。熱遮蔽体の場合の外側表面温度目標を「約」50°Cとしたのは、規格化された熱遮蔽板を規格化された間隔で整数枚重ねるため、ちょうど50°Cにできるとはかぎらないからである。一方、保温層の場合は、その厚さを任意に設定できるため、計算上はちょうど50°Cにできる。

上述のように軸対称無限長の計算モデルを採用したので、熱の収支計算は実質1次元（半径方向位置にのみ依存）の定常状態の計算となる。本章では、特に断らない限り、ターゲットアセンブリ1m当たりについてのものであるとする。

### 2.2.2 記号説明

熱収支計算で用いられる記号は表2.2に示すとおりである。

表 2.2 ターゲットアセンブリ保温構造熱計算記号一覧

Q <sub>a</sub>	: 保温層/熱遮蔽体通過熱量 (熱遮蔽体の場合は $Q_a = Q_{ac} + Q_{ar}$ )
Q <sub>ac</sub>	: 各熱遮蔽板間の熱伝導による伝熱量
Q <sub>ar</sub>	: 各熱遮蔽板間の輻射による伝熱量
Q <sub>b</sub>	: 保温層/熱遮蔽体外表面からの放散熱量 ( $Q_{bc} + Q_{br}$ )
Q <sub>bc</sub>	: 保温層/熱遮蔽外表面からの自然対流による放散熱量
Q <sub>br</sub>	: 保温層/熱遮蔽外表面からの輻射による放散熱量
T <sub>j</sub>	: 内側から j 番目の熱遮蔽板温度 ( $j = 1, 2, 3, \dots$ )
T <sub>i</sub>	: 保温層/熱遮蔽体内側表面温度 (熱遮蔽体の場合は $T_i = T_1$ )
T <sub>o</sub>	: 保温層/熱遮蔽体外側表面温度
T <sub>a</sub>	: 霧囲気温度 (20°C = 293.15 K)
T <sub>w</sub>	: テストセル壁面温度 (20°C = 293.15 K)
R <sub>j</sub>	: 内側から j 番目の熱遮蔽板半径 ( $j = 1, 2, 3, \dots$ )
R <sub>i</sub>	: 保温層/熱遮蔽体内面半径 (熱遮蔽体の場合は $R_i = R_1$ )
R <sub>o</sub>	: 保温層/熱遮蔽体外面半径
R <sub>p</sub>	: 热遮蔽体の層間ピッチ (0.005 m)
R <sub>w</sub>	: ターゲットアセンブリ中心からテストセル壁面までの距離 (1.5 m)
L	: 保温施工されたターゲットアセンブリ長さ (1 m)
d	: 保温層/熱遮蔽体の最外層の外径 (2R <sub>o</sub> )
A <sub>j</sub>	: 内側から j 番目の熱遮蔽板面積 ( $j = 1, 2, 3, \dots$ )
A <sub>i</sub>	: 保温層/熱遮蔽体の内側表面積 (熱遮蔽体の場合は $A_i = A_1$ )
A <sub>o</sub>	: 保温層/熱遮蔽体の外側表面積
A <sub>w</sub>	: テストセル壁面積
h <sub>o</sub>	: 保温層/熱遮蔽体外表面における熱伝達率 ( $h_c + h_r$ )
h <sub>c</sub>	: 保温層/熱遮蔽体外表面における自然対流熱伝達率
h <sub>r</sub>	: 保温層/熱遮蔽体外表面からの輻射による熱伝達率
$\lambda_i$	: 保温層の熱伝導率
$\lambda_a$	: 霧囲気の熱伝導率 (熱遮蔽板間のものにも適用)
P <sub>r</sub>	: 霧囲気のプラントル数
C <sub>1</sub>	: 霧囲気のプラントル数の関数
$\nu$	: 霧囲気の動粘性係数
N <sub>ud</sub>	: ヌセルト数
G <sub>r</sub>	: グラスホフ数
R <sub>ad</sub>	: レーレー数
$\beta$	: 体膨張係数
g	: 重力加速度 (9.80665 m/s <sup>2</sup> )
$\sigma$	: ステファン・ボルツマン定数 ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ )
$\epsilon_i$	: 保温層/熱遮蔽体表面の輻射率
$\epsilon_w$	: テストセル壁面の輻射率 (0.2)

### 2.2.3 保温層モデルの熱計算方法

以下のように1重の収束ループ(①)にて解を求めた。まず、①保温層厚さを適当に設定し、その際の保温層内部(内側表面と外側表面との温度差は $300 - 50 = 250^{\circ}\text{C}$ で固定)の通過熱量( $Q_a$ )と保温層外表面(温度 $50^{\circ}\text{C}$ で固定)からの放散熱量( $Q_b$ )とを以下(1)-(3)に従いそれぞれ独立に計算し、両者が等しくなるまで再度①の保温層厚さの設定から繰り返す。なお、 $Q_b$ に関しては、真空条件(ケースA10)では輻射( $Q_{br}$ )のみであり、Ar/He雰囲気条件(ケースA11, A12)では輻射および対流( $Q_{bc}$ )によるものの和となる。

#### (1) 保温層通過熱量: $Q_a$

$$Q_a = 2 \cdot \pi \cdot \lambda_i \cdot L \cdot (T_i - T_o) / \ln(R_o/R_i)$$

保温層外表面基準に通過熱量換算すると、

$$Q_a = A_o \cdot \lambda_i \cdot (T_i - T_o) / [R_o \cdot \ln(R_o/R_i)]$$

ここで、

$$A_o = 2 \cdot \pi \cdot R_o \cdot L$$

#### (2) 保温層外表面からの自然対流による放散熱量: $Q_{bc}$

$$Q_{bc} = A_o \cdot h_c \cdot (T_o - T_a)$$

ここで保温層外表面の自然対流熱伝達率( $h_c$ )は水平円柱まわりの自然対流熱伝達として以下のように求めた。

ヌセルト数:  $Nud$

$$2/Nud = \ln [1 + 2.475 / (C1 \cdot Rad^n)] \quad (10^{-8} \leq Rad \leq 5 \times 10^6 \text{ の場合})$$

$$Nud = (1.031) \cdot C1 \cdot Rad^{0.25} \quad (5 \times 10^6 \leq Rad \leq 10^9 \text{ の場合})$$

ここで、

$$n = 1/4 + 1/(10 + 5Rad^{0.175})$$

$$C1 = (3/4) \cdot [Pr / (2.4 + 4.9 \cdot Pr^{0.5} + 5 \cdot Pr)]^{0.25}$$

グラッシュフ数:  $Gr = g \cdot \beta \cdot (T_o - T_a) \cdot d^3 / \nu^2$

レーレ数:  $Rad = Gr \cdot Pr$

保温層外表面の自然対流熱伝達率:  $h_c = Nud \cdot \lambda_a / d$

#### (3) 保温層外表面からの輻射による放散熱量: $Q_{br}$

$$Q_{br} = \sigma \cdot A_w \cdot (T_o^4 - T_w^4) / [(1/\epsilon_w - 1) + (1/\epsilon_i)(A_w/A_o)]$$

保温層外表面基準の通過熱量に換算すると、

$$Q_{br} = \sigma \cdot A_o \cdot (T_o^4 - T_w^4) / [(1/\epsilon_i) + (1/\epsilon_w - 1)(A_o/A_w)]$$

## 2.2.4 热遮蔽体モデルの热計算方法

以下のように3重の収束ループ(①、②、③-④)にて解を求めた。まず、①热遮蔽板枚数を適当に設定し、さらに、②热遮蔽体表面温度(約50°C)を適当に設定すると、その際の热遮蔽体表面からの放散熱量( $Q_b$ )が以下(3)-(4)のように求まる。③热遮蔽体内側表面温度(内側から1枚目の热遮蔽板温度)300°Cの条件下で2枚目の热遮蔽板温度を適当に設定すると热遮蔽板間の通過熱量( $Q_a$ )が以下(1)-(2)のように求まる。この( $Q_a$ )が上記 $Q_b$ と等しくなるまで再度③の設定から繰り返す。④同様にして3枚目以降の热遮蔽板温度も順次求めることにより热遮蔽体外側表面温度が求まる。このようにして求めた外側表面温度と当初設定したものとが等しくなるまで再度②の設定から繰り返すことにより、热遮蔽板枚数に応じた热遮蔽体外側表面温度が求まる。さらに、この温度が50°Cより低い範囲で50°Cに最も近くなるように再度①の設定から繰り返す。

なお、 $Q_a$ に関しては、真空条件(ケースB10)では輻射( $Q_{ar}$ )のみであり、Ar/He雰囲気条件(ケースB11、B12)では輻射およびガスの熱伝導による伝熱量( $Q_{ac}$ )によるものの和となる。また、 $Q_b$ に関しては、真空条件(ケースB10)では輻射( $Q_{br}$ )のみであり、Ar/He雰囲気条件(ケースB11、B12)では輻射および表面での自然対流による伝熱量( $Q_{bc}$ )によるものの和となる。

### (1) 各热遮蔽板間( $j$ 番目と $j+1$ 番目)の热伝導による伝熱量: $Q_{ac}$

$$Q_{ac} = 2 \cdot \pi \cdot \lambda_a \cdot L \cdot (T_j - T_{j+1}) / \ln(R_{j+1}/R_j)$$

伝熱量を热遮蔽体間の外側層( $j+1$ 番目)の表面積基準に換算すると、

$$Q_{ac} = A_{j+1} \cdot \lambda_a \cdot (T_j - T_{j+1}) / [R_{j+1} \cdot \ln(R_{j+1}/R_j)]$$

ここで、

$$A_{j+1} = 2 \cdot \pi \cdot R_{j+1} \cdot L$$

### (2) 各热遮蔽板間( $j$ 番目と $j+1$ 番目)の輻射による伝熱量: $Q_{ar}$

$$Q_{ar} = \sigma \cdot A_{j+1} \cdot (T_j^4 - T_{j+1}^4) / [(1/\epsilon_i - 1) + (1/\epsilon_i) \cdot (A_{j+1}/A_j)]$$

### (3) 热遮蔽体の外側表面からの自然対流による放散熱量: $Q_{bc}$

$$Q_{bc} = A_o \cdot h_c \cdot (T_o - T_a)$$

ここで外側表面の自然対流熱伝達率( $h_c$ )は2.2.3(2)と同様の水平円柱まわりの自然対流熱伝達として求めた。

### (4) 热遮蔽体の外側表面からの輻射による放散熱量: $Q_{br}$

$$Q_{br} = \sigma \cdot A_w \cdot (T_o^4 - T_w^4) / [(1/\epsilon_w - 1) + (1/\epsilon_w) \cdot (A_o/A_w)]$$

热遮蔽体外側表面基準の通過熱量に換算すると、

$$Q_{br} = \sigma \cdot A_o \cdot (T_o^4 - T_w^4) / [(1/\epsilon_i) + (1/\epsilon_w - 1) \cdot (A_o/A_w)]$$

## 2.3 計算結果および考察

### 2.3.1 保温層/熱遮蔽体内部温度分布

保温層/熱遮蔽体の内側および外側温度条件を満たし、かつ、保温層/熱遮蔽体内部通過熱量( $Q_a$ )と保温層/熱遮蔽体外表面からの放散熱量( $Q_b$ )とが釣り合うように保温層厚さ/熱遮蔽板枚数を上記の方法で定めたときの保温層/熱遮蔽体内部での温度分布を図2.3に示す。

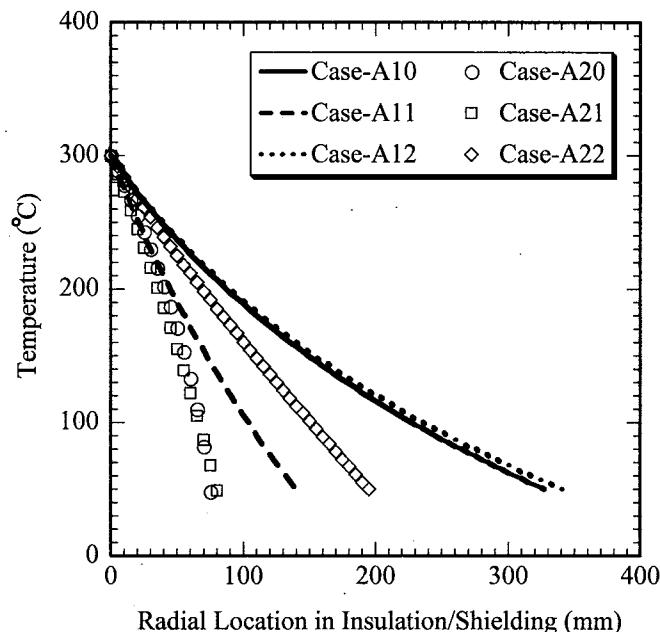


図2.3 保温層/熱遮蔽体内部温度

保温層構造(ケースA10, A11, A12)の場合、保温層内部温度:Tは対称軸からの半径方向位置:R(図2.3の横軸原点がR=143.7 mmの位置)に従い以下の式で表されるように連続的な値をとる。

$$T = \{T_i \cdot \ln(R_o/R) - T_o \cdot \ln(R_i/R)\} / \{\ln(R_o/R_i)\}$$

ここで、内側表面温度:Ti=300°C、内側表面温度:To=50°Cである。一方、熱遮蔽体構造(ケースA20, A21, A22)の場合は、内部の熱移動は隣接熱遮蔽板どうしの熱伝導および輻射となり、図2.3に示すように熱遮蔽板の位置(半径方向位置で5 mmごと)で温度が与えられる。なお、各ケースでの代表的な位置での温度の数値データは付録2.4に示す。

### 2.3.2 保温層と熱遮蔽体との性能比較

図 2.3 の温度を与える保温層厚さ/熱遮蔽板枚数およびそのときの移動熱量( $= Q_a = Q_b$ )を表 2.3 に示す。

表 2.3 ターゲットアセンブリ保温構造計算結果

ケース	必要厚さ	外側表面温度	移動熱量
A10 (保温層、真空)	327.0 mm	50.0 °C	94.4 W/m
A11 (保温層、Ar)	139.6 mm	50.0 °C	165.1 W/m
A12 (保温層、He)	341.0 mm	50.0 °C	525.0 W/m
A20 (熱遮蔽体、真空)	16 層 (75 mm)	48.1 °C	45.8 W/m
A21 (熱遮蔽体、Ar)	17 層 (80 mm)	48.8 °C	130.0 W/m
A22 (熱遮蔽体、He)	40 層 (195 mm)	49.7 °C	396.0 W/m

各雰囲気条件(真空/Ar/He)において、必要な保温層厚さと必要な熱遮蔽体厚さ( $= (\text{必要な熱遮蔽板枚数} - 1) \times 5 \text{ mm}$ )とを比較すると、いずれも熱遮蔽体のほうがコンパクトに保温構造を実現できることがわかる。また、コンパクトになることで表面積も少なくなるので、熱遮蔽体のほうが熱損失(表 2.3 中の「移動熱量」)が少なく、必要なヒーター容量も小さくなる。

ケース A10、A11 では空気中の熱伝導値を用いて保温層内熱伝導を求めたが、現状設計では安全側に判断して、セラミックファイバ保温層よりもステンレス鋼板の熱遮蔽体を用いるべきである。

### 2.3.3 热遮蔽板輻射率の影響

ここまで熱計算においてはステンレス鋼板の輻射率( $\epsilon_i$ )として 0.2 を用いてきたが、0.02 くらいまで可能であると考えられる。そこで、ケース A20、A21、A22 について、熱遮蔽板枚数目標値に対して必要な輻射率を計算で求めた。ただし、最外層の遮蔽板輻射率も同時に低下させると他の遮蔽板輻射率の向上の効果が殆ど無くなることが判明したので最外層の輻射率のみは 0.2 で固定した。また、輻射率として任意の値が選べるので熱遮蔽体外側表面の温度を 50°C で固定した。

#### (1) 真空条件下での効果

各ケースの計算結果を図 2.4 に示す。輻射率を 0.2 よりも小さくすることで熱遮蔽板枚数を減らすことができる。特に、真空の場合(A20)は熱遮蔽板間の熱の移動は輻射のみによるので輻射率の効果が顕著で、輻射率を約 0.015 低下させるごとに熱遮蔽板を 1 枚ずつ減らせる。(熱遮蔽板枚数と輻射率の数値データは付録 2.5 に示す。) 輻射率が 0.2 より低い熱遮蔽板を採用すると、例えば、固定長期間運転により輻射率が増加(熱遮蔽能力が低下)して、0.05 になると仮定しても、真空中での使用ならば、5 枚の熱遮蔽板で保温条件を満たせる。

ここで注意しておくべきことは、最外層の輻射率も同時に低下させると外側表面からの放射熱( $Q_a$ )もそれにはほぼ比例して低下し、それと同じ値であるべき層間移動熱( $Q_b$ )の値(付録 2.5 参照)を小さくする必要が生じ、結局、輻射率の向上の効果と相殺して熱遮蔽板枚数が殆ど変わらなくなりことである。(しかしながら、熱遮蔽体のコンパクト化よりもヒーター容量の低減を優先するなら、最外層も含む全熱遮蔽板の輻射率の一律低下に意味はある。)

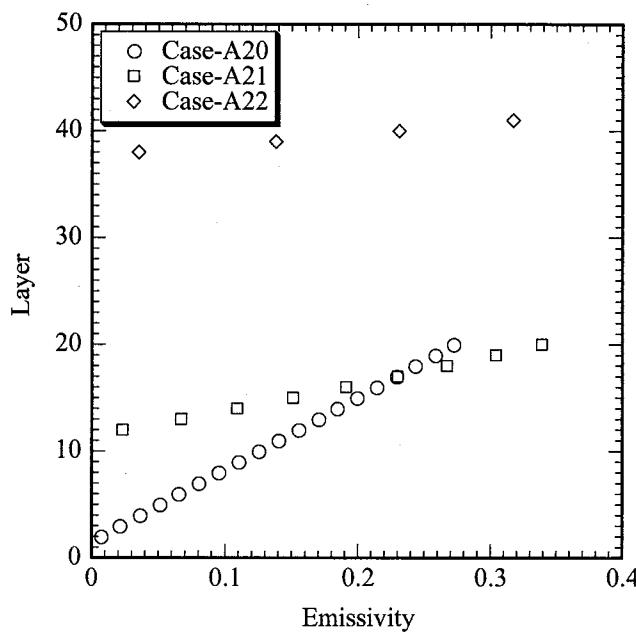


図 2.4 热遮蔽板枚数と輻射率

## (2) ガス雰囲気条件下での効果

ガス雰囲気条件下での熱遮蔽板枚数と輻射率の関係を図 2.4 に示す。テストセル室雰囲気が Ar ガスの場合(A21)および He ガスの場合(A22)は熱遮蔽板輻射率低下の効果は真空の場合ほど期待できない。例えば、輻射率をどれだけ小さくしても、熱遮蔽板枚数は、Ar ガスの場合は 12 枚(輻射率 0.02340 以下)までしか減らせない。He ガスの場合にいたっては 38 枚(輻射率 0.03463 以下)までしか減らせない。これは、隣接する熱遮蔽板間の熱移動量( $Q_a$ )のうち輻射によるもの( $Q_{ar}$ )が小さく、熱移動がほぼ熱伝導( $Q_{ac}$ )の形態で起きるからである。例えば、ケース A21 で熱遮蔽板枚数を最低の 12 枚にした場合(輻射率:0.02340)、 $Q_a (= 124.2 \text{ W})$  のうち、 $Q_{ar}$  は 3.7-9.4 W にすぎない。(両ケースでの  $Q_a$  の内訳は付録 2.6 に示す。)

Ar ガスの約 8 倍の熱伝導率を有する He ガスの場合、隣接する熱遮蔽板間の温度差が小さくても  $Q_{ac}$  が大きくなるので、 $Q_a$  を  $Q_b (\approx 400 \text{ W/m})$  と等しい値に抑えるには熱遮蔽体内の温度勾配を緩やかにする必要が生じ、結局、Ar ガスの場合に比べて熱遮蔽板枚数が多くなる。また、輻射率低下による効果もあまりない。さらに、熱遮蔽体外側表面からの放熱( $Q_a$ )も約 400 W/m であり、真空条件での約 50 W/m Ar ガス雰囲気条件での約 140 W/m と比較して大きく、ヒーターの必要容量も大きくなる。

### 3. 背面壁およびその近傍の保温条件に関する熱解析

保温構造体施工が困難である背面壁およびその近傍のターゲットアセンブリに対し、加熱ヒーターによる保温条件を検討した。この検討は、背面壁、ターゲットアセンブリ(部分)、テストセル室雰囲気、VTA 表面の間の熱伝導、輻射、表面熱伝達およびヒーター加熱の熱収支が合うように計算することをもって実施した。尚、ヒーターの詳細構造は、今後の検討課題である。

#### 3.1 検討条件

##### 3.1.1 計算モデル

検討対象範囲を図 3.1 に示す。背面壁が上下対象であるため、上流の絞りノズルから重陽子ビーム中心線までを対象範囲とした。詳細は以下のとおりである。

###### (1) 要素分割

検討対象範囲を図 3.2 に示すように 11 個の要素①-⑪に分割(一部ケースでは 12 要素に分割)したうえで、図 3.3 に模式的に示すように、各要素、テストセル雰囲、VTA 表面、ヒーターの間に熱移動があるものとした。各要素の熱計算上の特性は以下のとおりである。各要素の寸法、配置の詳細に関しては付録 3.1 に示す。

###### 要素①-④ :

雰囲気側の空間スペースが狭いため、保温施工の困難な部分をモデル化した要素である。加熱ヒータからの熱をターゲットアセンブリに有効に伝達させるために、熱遮蔽体を 1 層設置する。この熱遮蔽体温度はターゲットアセンブリ温度と同温とする。

###### 要素⑤-⑥ :

背面壁への伝熱経路を構成しており、その部分をモデル化した要素である。内部要素であるため、ヒーターを施工しない。

###### 要素⑦-⑪(⑫) :

背面壁の上半分をモデル化した要素である。温度が最も低くなる背面壁中心付近(ただし、重陽子ビームのフットプリント付近は除外)になるべく過熱ヒーターを取り付けるために、一部ケースでは要素⑪をさらに⑪X+⑫X または⑪Y+⑫Y に分割した。(図 3.4 参照)

###### (2) 要素の形状および寸法

計算に際しては、各要素の体積、各要素内の伝熱経路長さ、各要素間の境界面積、各要素のテストセル雰囲気への曝露部表面積を形状データとして与えた。図 3.2 に示すように計算対象範囲のターゲットアセンブリおよび背面壁は複雑な形状であるが、計算は、これらの要素を以下の方法により等価な直方体として簡略化して扱った。

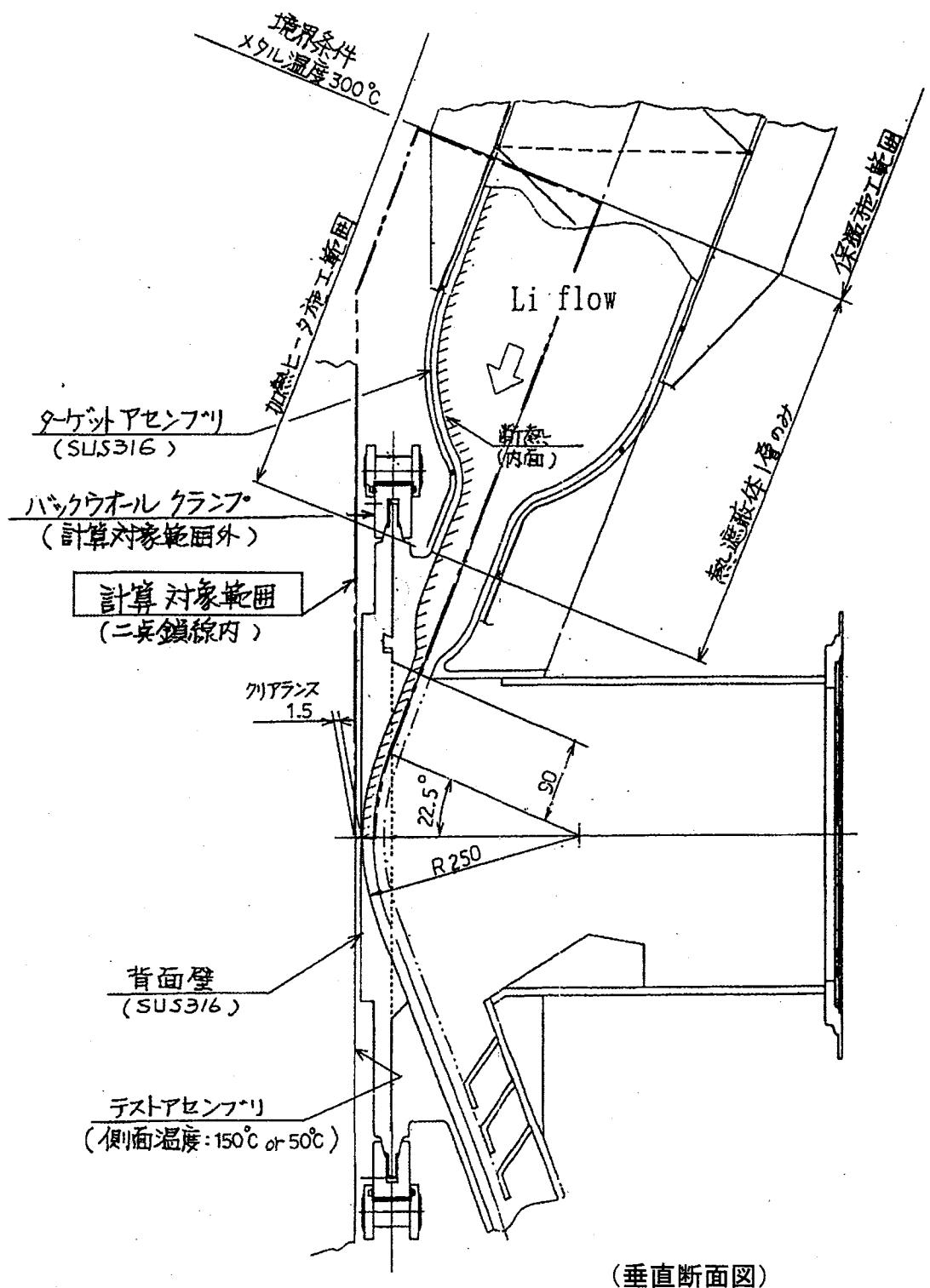


図3.1 背面壁およびその近傍の保温条件計算対象範囲

注記

①～⑪：要素 No. を示す。

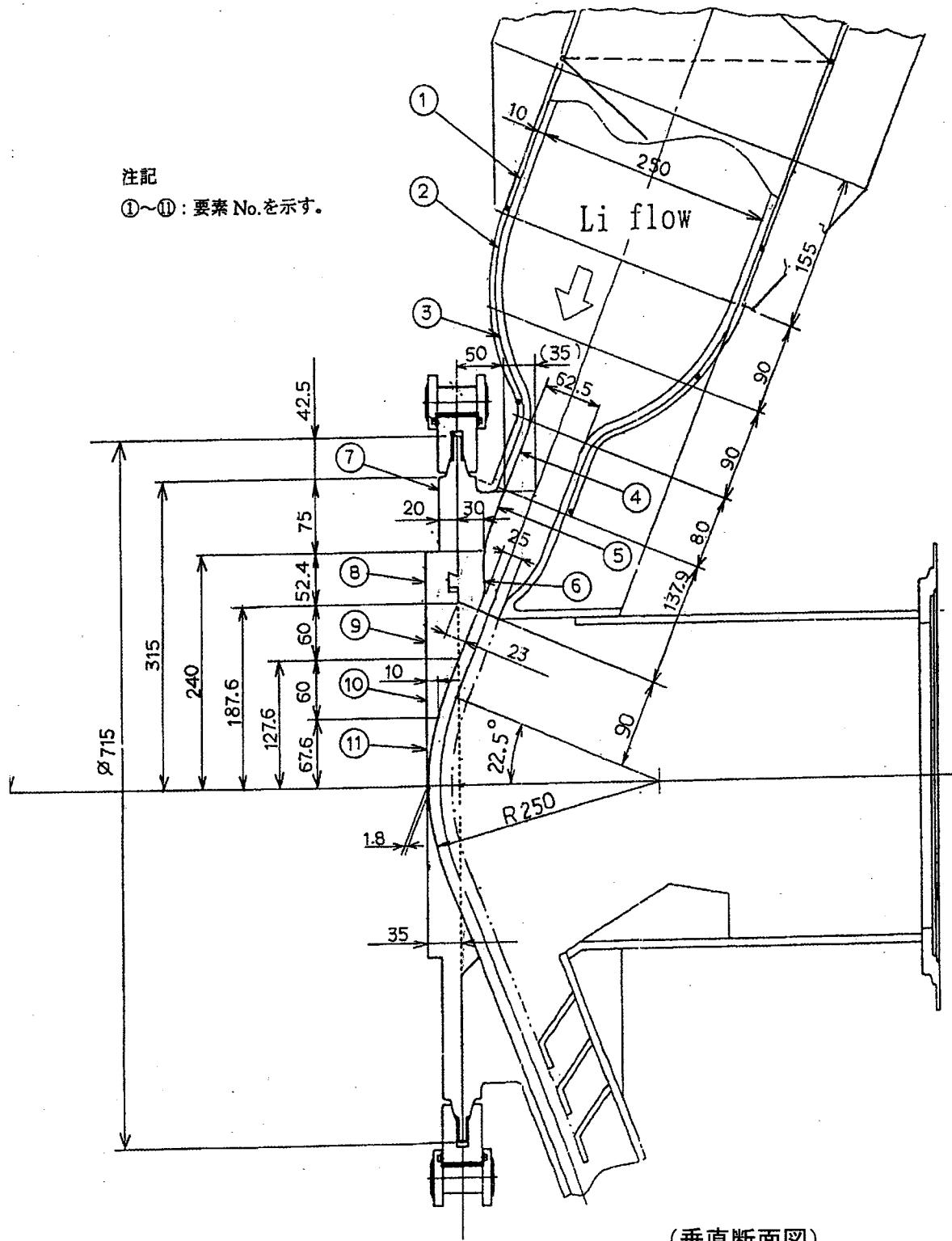
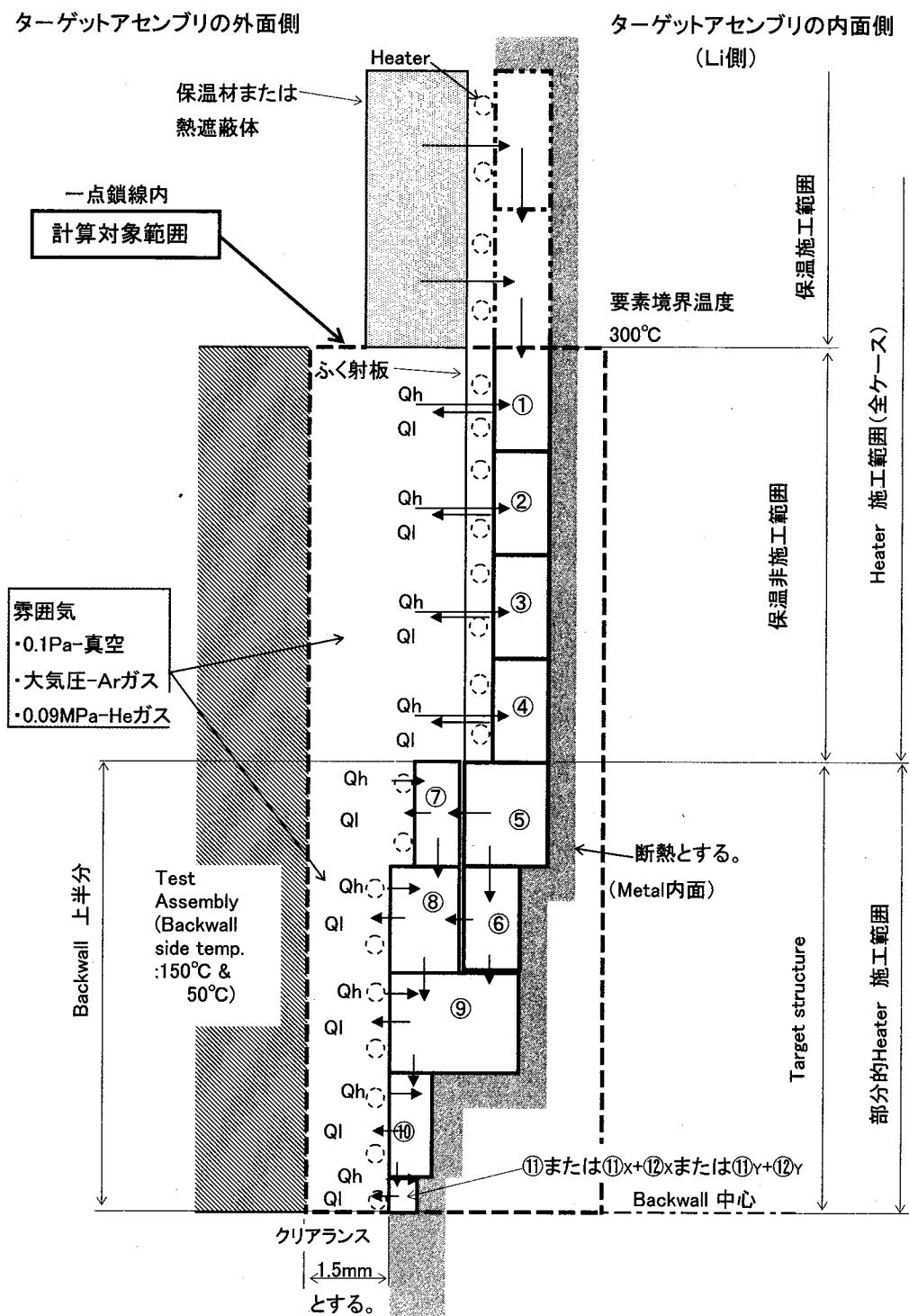


図3.2 計算対象範囲の要素分割



注記

- ・ ①～⑪(⑫)：計算対象部分の要素(element)を示す。
  - ・ ←：熱の流れを示す。
  - ・  $Q_{heater}$  : Heaterからの入熱量
  - ・  $Q_{loss}$  : ターゲットアセンブリ(背面壁を含む)からの放散熱量
  - ・ 接触熱抵抗による伝熱面：要素No.⑤～⑦間、⑥～⑧間、及び、⑥～⑨間

図3.3 背面壁及びその近傍の温度分布計算モデル

**要素の伝熱面積 :**

- ・要素間の境界部の伝熱面積は、実形状の伝熱面積に同じにする。
- ・要素の中心部の伝熱面積は、要素出入口境界部の平均値とする。
- ・上下方向に配置されている要素間の伝熱計算においては、要素境界入口部から要素中心間の伝熱面積は入口部と中心の平均値を使用し、要素中心から要素境界出口間についても同様に平均値を使用する。
- ・水平方向に配置されている要素間（要素⑤-⑦間、⑥-⑧間）の伝熱計算、および、背面壁からの放熱計算においては、背面壁側面の上半円形部分を各要素高さレベルで切断して得られたところの背面壁側面積を伝熱面積とする。

**要素の厚さ、幅、長さ :**

- ・要素の厚さは、実形状の支配的な厚さを代表厚さとして使用する。
- ・要素の幅は、上記に示す伝熱面積から要素厚さで割った値とする。
- ・要素の長さは、実形状を要素分割した個々の高さを使用する。但し、要素②、③のように曲面を有するものは、その曲面に沿った長さを使用する。

背面壁要素の放熱面面積：円盤状背面壁を形成する要素⑦-⑪(⑫)の放熱面面積は付録 3.2 に示す。

(3) 霧囲気および温度境界条件

要素①-⑪相互の熱移動および要素外との熱移動は模式的に図 3.3 に示したが、詳細は以下のとおりである。

**霧囲気 :**

テストセル室霧囲気としては、2章と同様に、真空、Ar(20°C、大気圧)、He(20°C、0.09 MPa)の3通りに関し検討した。

**ターゲットアセンブリ側境界条件 :**

要素①に接するターゲットアセンブリ部分は2章で示した方法により保温されていて、質量も要素①-⑪(⑫)に比べて格段に大きいので、

- ・リチウム装荷前のターゲットアセンブリ温度：300°C（一定温度境界条件）とした。

**内側境界条件 :**

要素①-⑥および要素⑨-⑪の内面側は、実際はリチウム装荷前には不活性ガスで満たされているが、本検討では断熱されているものとした。

**外側境界条件 :**

ターゲットアセンブリ及び背面壁からの放熱は、全てテセトアセンブリの背面壁側との間で Ar/He の熱伝導および輻射にて行われるものとした。また、ここでは、ターゲットアセンブリ及び背面壁の放熱面と垂直テストアセンブリ(VTA)受熱面(表面温度：50°C/150°C、輻射率：0.2)は同じ形状で、距離 1.5 mm で平行に対面しているものとした。

#### (4) 加熱ヒータ

付録 3.1 に示すように、要素①-④での加熱ヒーター施工面の面積は放熱面の面積と同一であるが、要素⑨-⑪ではヒーター施工面の面積は放熱面の面積より小さくなる。これは、背面壁端部でのリップ溶接を考慮して、背面壁形状が端部付近に段差がある円盤状であり、直径 715 mm の背面壁の表面のうち、ヒーター施工可能範囲を中心部の直径 630 mm の領域（除、要素⑫X、⑫Y）と仮定したからである。ヒーター施工「可能」な面の面積の詳細を付録 3.3 に示す。加熱ヒーターの取り付け場所、要素は以下の 4 通りである。

- ・ターゲットアセンブリのみに施工：要素①-④
- ・背面壁の一部にも施工：要素①-④、⑦-⑨（図 3.4(1) 参照）
- ・背面壁施工範囲を拡大：要素①-④、⑦-⑩、⑪X（図 3.4(2) 参照）
- ・背面壁施工範囲を拡大：要素①-④、⑦-⑩、⑪Y（図 3.4(3) 参照）

加熱ヒーターはアセンブリ、背面壁それぞれに均一に配置するものとする。すなわちアセンブリ、背面壁それぞれの範囲内で要素ごとのヒータ入熱は各要素のヒーター施工面面積に比例する。（比例係数 (W/m<sup>2</sup>) はアセンブリと背面壁とでは異なる。）

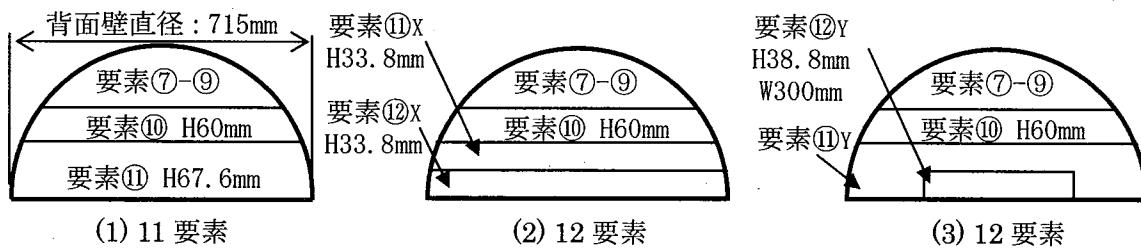


図 3.4 背面壁要素分割方法

#### (5) ターゲットアセンブリと背面壁の境界面の接触熱抵抗

要素⑤-⑦間、要素⑥-⑧間、要素⑥-⑨間の接触熱抵抗 (R) は、熱伝導の理論に基づく式[3.1]において介在物による伝熱の項を無視（保守側評価）した以下の式を用いて計算した。

$$1/R = 1.7 \times 10^5 / \{(\delta_1 + \delta_0)/\lambda_1 + (\delta_2 + \delta_0)/\lambda_2\} \times (a/Act)$$

ここで、1/R、δ、λの単位をそれぞれ W/m<sup>2</sup>•K、μm、W/m•K とする。また、δ<sub>0</sub> = 23、δ<sub>1</sub> = δ<sub>2</sub> = 6 とした。（計算式中の記号の説明は後で示す。）

接触部の熱伝達 (1/R) は、真の接触部面積と見かけの接触部面積との比 (a/Act) に比例する。この比はまた、押し付け圧力 (P) と部材の硬さ (H) により、a/Act = 0.6P/H と近似することもできる。（H として ブリネル硬さ HB = 187 MPa を採用した。）本計算では以下の 3 通りを仮定した。（1/R の値に幅があるのは、接触部両側の温度に依存するから。）

$$a/Act = 0.1 \quad (P = 31 \text{ MPa} \text{ に相当}) \text{ の場合 : } \quad 1/R = 4-5 \text{ kW/m}^2\text{•K}$$

$$P = 0.09 \text{ MPa} \quad (a/Act = 2.9 \times 10^{-4} \text{ に相当}) \text{ の場合 : } \quad 1/R = 12-17 \text{ W/m}^2\text{•K}$$

$$P = 0.18 \text{ MPa} \quad (a/Act = 5.8 \times 10^{-4} \text{ に相当}) \text{ の場合 : } \quad 1/R \approx 26 \text{ W/m}^2\text{•K}$$

### 3.1.2 物性値

#### (1) テストセル室雰囲気

Ar および He ガスの物性値はそれぞれ付録 2.2[2.3] および付録 2.3[2.4] によるものとする。

#### (2) 金属部熱伝導率

ターゲットアセンブリおよび背面壁の材質は SUS316 であるとして、その熱伝導率は付録 3.4[3.2] によるものとする。

#### (3) 輻射率

本計算ではターゲットアセンブリ、背面壁、VTA の輻射率は同一であるとして、輻射率 0.05–0.2 の範囲で検討した。

### 3.1.3 検討ケース

テストセル室雰囲気、VTA 表面温度、アセンブリと背面壁との間の接触部の熱伝達、輻射率（ターゲットアセンブリ、背面壁、VTA）、ヒーター施工範囲の違いにより、表 3.1 に示すようなケースに関し検討した。

表 3.1 背面壁およびその近傍の保温条件検討ケース

ケース	雰囲気	VTA 表面温度	接触熱伝達条件	輻射率	ヒーター施工*
B001	真空	50°C	接触面積比 0.1	0.2	TA(①–④)
B002	真空	150°C	接触面積比 0.1	0.2	TA(①–④)
B003	真空	50°C	接触面積比 0.1	0.1	TA(①–④)
B004	真空	150°C	接触面積比 0.1	0.1	TA(①–④)
B005	真空	50°C	接触面積比 0.1	0.05	TA(①–④)
B006	真空	150°C	接触面積比 0.1	0.05	TA(①–④)
B007	真空	50°C	押付圧 0.09 MPa	0.2	TA(①–④)
B101	Ar	50°C	接触面積比 0.1	0.2	TA(①–④)
B102	Ar	150°C	接触面積比 0.1	0.2	TA(①–④)
B201	He	50°C	押付圧 0.09 MPa	0.2	TA(①–④)
B202	He	150°C	押付圧 0.09 MPa	0.2	TA(①–④)
B203	He	50°C	押付圧 0.09 MPa	0.1	TA(①–④)
B204	He	150°C	押付圧 0.09 MPa	0.1	TA(①–④)
B205	He	50°C	押付圧 0.09 MPa	0.05	TA(①–④)
B206	He	150°C	押付圧 0.09 MPa	0.05	TA(①–④)
B207	He	50°C	押付圧 0.18 MPa	0.2	TA(①–④)
B211	He	50°C	押付圧 0.09 MPa	0.2	TA + BW(⑦–⑨)
B212	He	50°C	押付圧 0.09 MPa	0.1	TA + BW(⑦–⑨)
B213	He	50°C	押付圧 0.09 MPa	0.05	TA + BW(⑦–⑨)
B221	He	50°C	押付圧 0.09 MPa	0.2	TA + BW(⑦–⑪X)
B231	He	50°C	押付圧 0.09 MPa	0.2	TA + BW(⑦–⑪Y)

\* TA : ターゲットアセンブリ (要素①–⑥) のうち要素①–④にヒーターを取り付け

TA+BA : 背面壁の一部 (要素⑦–⑨、⑦–⑪X、⑦–⑪Y) にもヒーターを取り付け

### 3.2 計算方法

#### 3.2.1 基本的方法

熱計算は、ヒーター入熱、要素①-⑪相互間熱移動、要素外への放熱の熱収支の整合性が取れるような要素①-⑪温度を試行錯誤的な収束により求めたものである。この熱計算に含まれる熱移動は具体的には以下のとおりである。

- ・ヒーター入熱
- ・要素①-⑥内、要素⑦-⑪(⑫)内の熱伝導(SUS316 内)
- ・要素⑤-⑦間、要素⑥-⑧間、要素⑥-⑨間の接触部の熱伝達(SUS316-SUS316 間)
- ・要素①-④および要素⑦-⑪(⑫)の表面での雰囲気(Ar、He)との熱伝導による放熱
- ・要素①-④および要素⑦-⑪(⑫)の表面での VTA との輻射による放熱

前述の各ケースに対し、以下の温度を目標としてヒーター入熱を設定した。

- ・要素①-⑪(⑫)内最低温度目標：200°C以上
- ・要素①-⑪(⑫)内最高温度目標：300°C以下

最低温度目標は Li 固化の防止を目的とした若干余裕のある値である。また、最高温度目標はターゲットアセンブリおよび背面壁構造の健全性の保持（変形、変質の防止）を目的とした目安である。

上述のように上下対象の計算モデルを採用したので、本章では、特に断らない限り、ターゲットアセンブリおよび背面壁の半分についてのものであるとする。

## 3.2.2 記号説明

熱収支計算で用いられる記号は表 3.2 に示すとおりである。

表 3.2 背面壁およびその近傍の保温条件熱計算記号一覧

$Q_h$	: 各要素への加熱ヒーター供給熱量
$Q_H$	: 全要素への加熱ヒーター供給熱量(全要素に関する $Q_h$ の和)
$Q_l$	: 各要素からの放散熱量
$Q_L$	: 全要素からの放散熱量(全要素に関する $Q_l$ の和)
$Q_{1-4}$	: 要素内のメタル熱伝導による伝熱
$T_{1-4}$	: 要素外側境界の温度
$T_0$	: 要素中心の温度
$Q_{ct}$	: メタル接触部における伝熱
$Q_c$	: 雰囲気ガス(Ar、He)の熱伝導による放散熱量
$Q_r$	: 辐射による放散熱量
$T_h$	: 一般的な高温側温度
$T_c$	: 一般的な低温側温度
$T_{VTA}$	: テストアセンブリ温度
$\delta$	: 背面壁またはその近傍ターゲットアセンブリから VTA までの距離
$t$	: 要素の厚さ
$W$	: 要素の幅
$L$	: 要素の長さ
$A$	: 要素の内部の伝熱面積
$A_{ct}$	: 要素間接触面の見掛け上の面積
$a$	: 要素間接触面の真の接触面積の和
$A_h$	: 要素へのヒーター入熱面積
$A_l$	: 要素放熱面積
$A_{VTA}$	: 要素放熱面積と輻射熱をやりとりする VTA 部分面積 ( $A_{VTA} = A_l$ と簡単化)
$R$	: 単位面積当たりの接触熱抵抗
$\lambda$	: メタルの熱伝導率
$\lambda_1, \lambda_2$	: 接触面両側のメタルの熱伝導率
$\lambda_a$	: 雰囲気ガス(Ar、He)の熱伝導率
$\delta_0$	: 接触熱抵抗計算用定数 ( $23 \mu\text{m}$ )
$\delta_1, \delta_2$	: 接触面両側のメタルの粗さの最大高さ (ともに, $6 \mu\text{m}$ )
$\sigma$	: ステファン・ボルツマン定数 $= 5.67 \times 10^{-8}$
$\epsilon$	: 背面壁およびその近傍ターゲットアセンブリの輻射率 ( $\epsilon = \epsilon_{VTA}$ )
$\epsilon_{VTA}$	: 垂直テストアセンブリの輻射率 ( $\epsilon_{VTA} = \epsilon$ )

### 3.2.3 热計算方法

3.2.1で述べた個々の热移動およびそれら相互の関係は以下のとおりである。

#### (1) 加熱ヒーター供給熱量: $Q_H$

計算対象範囲（対象モデルなので上半分）全体で考えると、热バランス上から、加熱ヒーター供給熱量は、全放散熱量に等しく、

$$Q_H = Q_L$$

となる。

#### (2) 要素内の热バランス

热が要素中心に向かう場合を正の符号と定義すると、ひとつの要素  $i$  内での热伝導による热収支は、

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 0$$

である。また、他の要素との接触面要素の場合、例えば、

$$Q_3 = Q_{ct}$$

であり、雰囲気（真空を含む）との接触面がある要素の場合、

$$Q_4 = Q_1$$

である。これらの関係を模式的に図 3.5 に示す。

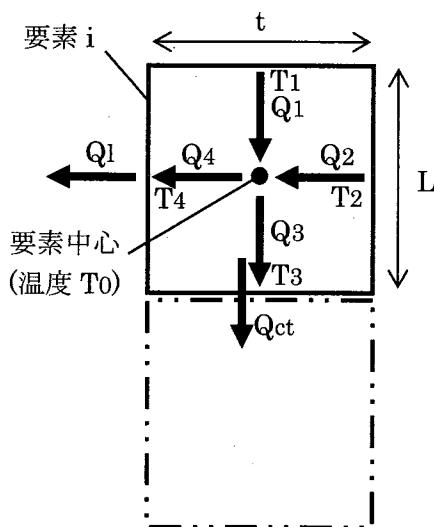


図 3.5 要素内热伝導  
(他要素と接触、雰囲気と接触している要素の例)

## (3) メタル熱伝導による伝熱

熱が要素中心に向かう場合を正の符号と定義すると以下のとおりである。

$$Q_1 = (T_1 - T_0) \cdot (t \cdot W) \cdot \lambda / (L/2)$$

$$Q_2 = (T_2 - T_0) \cdot (L \cdot W) \cdot \lambda / (t/2)$$

$$Q_3 = (T_3 - T_0) \cdot (t \cdot W) \cdot \lambda / (L/2)$$

$$Q_4 = (T_4 - T_0) \cdot (L \cdot W) \cdot \lambda / (t/2)$$

(4) メタル接触部における伝熱 :  $Q_{ct}$ 

3.1.1 で述べた接触熱抵抗  $R$  を用いて、以下のようになる。

$$Q_{ct} = A_{ct}/R \cdot (T_h - T_c)$$

(5) 放散熱量 :  $Q_1$ 

真空の場合は VTA との間での輻射による放熱のみを考慮して、

$$Q_1 = Q_r$$

であるが、ガス雰囲気の場合は、熱伝導の分も考慮して

$$Q_1 = Q_c + Q_r$$

となる。

(6) 輻射による伝熱 :  $Q_r$ 

$$Q_r = \sigma \cdot A_1 \cdot (T_4^4 - TVTA^4) / [(1/\epsilon_{VTA}) + (1/\epsilon) \cdot (A_1/AVTA)]$$

ただし、本計算モデルでは、 $AVTA = A_1$ 、 $\epsilon_{VTA} = \epsilon$ とした。

(7) 雰囲気ガスの熱伝導による伝熱 :  $Q_c$ 

$$Q_c = A_1 \cdot \lambda_a / \delta \cdot (T_4 - TVTA)$$

### 3.3 計算結果および考察

#### 3.3.1 溫度分布の一般的傾向

全ケースでのターゲットアセンブリ(TA)および背面壁(BW)の。温度および放熱の計算結果をそれぞれ表3.3および表3.4に示す。また、各ケースでの要素間熱移動の様子を付録3.5に示す。いずれのケースでも、最低温度は背面壁中心(図3.3で示される解析領域の下端)で与えられる。これは、背面壁中心にはヒーターを施工できることおよび相対的に温度が低いVTAが近く(間隙1.5mm)にあることによる。なお、ヒーターをアセンブリのみに施工するケース(B001-B207)では最高温度が300°Cを超えないようにヒーター入熱を調整し、結果的に250W程度の入熱となつた。(上下対象モデルなので、この部分に必要なヒーター能力は500Wである。)

#### 3.3.2 真空環境下での温度

真空環境下での熱移動は、要素内/間の熱伝導、要素間接触部の熱伝達、要素-VTA間の輻射の形態をとる。アセンブリおよび背面壁の熱移動および温度は入力条件により以下のように影響を受ける。

##### (1) VTA 温度の影響

図3.6にVTA温度(TVTA)が50°Cの場合(B001)と150°Cの場合(B002)の温度を示す。B001では背面壁の中心温度は215°Cであり目標値(200°C)以上だが、B001では185°Cであり、VTA温度(50-150°Cと評価された)によっては余裕の無い状態である。なお、両ケースでの背面壁温度の違いは26-30°Cであり、VTA温度の違いほど大きくはない。

##### (2) 輻射率の影響

図3.7に輻射率が0.2の場合(B001)と0.05の場合(B005)の温度を示す。輻射率を小さくすることにより背面壁での温度低下を抑制でき、B005では背面壁の中心温度は244°Cである。これは、ヒーターの熱が背面壁へ供給される途上での輻射による放熱ロス(Qr)が小さくなるからである。B001-B006のアセンブリ放熱要素①-④中心温度は240-300°C(表3.3)であり、VTAの低温と比較するとほぼ一定であるので、VTAアセンブリからの放熱は輻射率にほぼ比例する。(表3.4)

真空条件下でアセンブリ-背面壁間の接触が良い場合は輻射率を0.1程度以下に保てば余裕を持って保温条件を満足できる。

表3.3 背面壁およびその近傍の温度計算結果

ケース	雰囲気	TVTA (°C)	輻射率	ヒータ施工要素	計算条件												計算結果 要素中心または背面壁(BW)中心温度(°C)																														
					ヒータ入熱(W)			TA			BW			1			2			3			4			5			6			7			8			9			10			11			12
E001		50	0.2		149	30000	28855	2752	2396	2020	195.5	200.1	194.8	191.5	187.8	185.5	184.6																														
B002		150	0.2		116	300.0	291.7	281.9	255.6	227.5	222.7	226.1	222.2	219.8	217.1	215.5	214.8																														
E003		50	0.1		79	30000	2882	2767	2512	227.3	223.1	226.1	222.7	220.6	218.2	216.8	216.1																														
B004	真空	150			61	30000	2911	2824	2631	244.8	241.6	243.8	241.2	239.7	237.8	236.7	236.3																														
E005		50	0.05		43	30000	2907	2824	2654	250.6	248.0	249.8	247.7	246.4	244.9	244.0	243.6																														
B006		150			33	30000	2928	2864	2734	261.9	259.9	261.3	259.6	258.6	257.5	256.8	256.5																														
E007		50	0.2		136	2983	2881	2710	2335	212.4	206.8	172.3	169.2	166.1	163.3	161.1	160.7																														
B101	Ar	50	0.2	1-4	180	30000	273.8	245.8	177.9	109.7	95.4	106.5	93.6	86.9	79.6	75.6	73.8																														
B102		150		0.1	133	30000	2843	2674	2256	182.8	174.2	180.8	173.1	169.1	164.8	162.5	161.5																														
E201		50	0.2		241	2962	2752	2472	191.5	143.5	132.7	66.6	58.5	54.5	51.9	50.7	50.5																														
E202		150			171	2976	2845	2675	2336	204.5	198.1	159.1	154.5	152.3	151.0	150.3	150.2																														
E203		50	0.1		187	2957	2718	2414	184.9	138.7	128.4	65.9	58.1	54.3	51.8	50.7	50.5																														
E204		150		0.09	128	2973	2824	2637	229.4	201.5	195.4	158.7	154.3	152.2	150.9	150.3	150.2																														
E205		50	0.05		162	295.5	2701	2484	184.5	136.3	126.3	65.5	57.9	54.2	51.8	50.7	50.5																														
E206		150			108	2971	2813	2617	2272	200.0	194.1	158.5	154.2	152.2	150.9	150.3	150.2																														
E207		0.2			245	295.8	272	2395	173.5	116.6	103.8	69.4	59.9	55.2	52.2	50.8	50.6																														
E211	He	0.2	1-4		215	2096	2987	2929	2931	29660	298.2	291.7	365.3	266.2	198.3	128.6	79.0	71.5																													
E212		0.1	1-4		155	2051	2987	2924	2926	2956	298.0	291.4	366.6	265.2	206.8	127.9	78.9	71.4																													
E213		0.05	7-9		128	2020	2986	2920	2921	2950	297.2	290.6	366.0	263.9	205.5	127.3	78.7	71.3																													
E221		50	1-4		215	3226	2987	2929	2931	2960	298.2	293.2	351.7	267.8	242.2	223.9	193.4	153.7	146.9																												
E221		7-11X	0.2		208	4238	2984	2976	3053	3232	338.4	334.9	422.1	321.3	269.6	231.7	181.7	173.1																													
E231		7-11Y	1-4		215	3469	2987	2929	2931	2960	298.2	293.3	351.0	267.8	243.9	230.3	212.6	190.0	186.2																												
			210	4241	2932	2962	3018	3155	327.0	323.1	401.4	306.2	279.3	264.1	243.4	216.6	212.1		背面壁(BW)要素																												

ヒーター施工範囲を   で示す。

表3.4 背面壁およびその近傍の放熱計算結果

ケース	計算条件				計算結果											
	雰囲気	TV <sub>TA</sub> (℃)	輻射率	ヒータ施工要素	ヒータ入熱(W)				TA放熱(W)				BW放熱(W)			
					TA	BW	合計	Q <sub>r</sub>	Q <sub>c</sub>	合計	Q <sub>r</sub>	Q <sub>c</sub>	合計	Q <sub>r</sub>	Q <sub>c</sub>	合計
B001	50	0.2			149	104	0	104	45	0	45	149	0	0	149	0
B002	150				116	82	0	82	34	0	34	116	0	0	116	0
B003	50	0.1			79	50	0	50	29	0	29	79	0	0	79	0
B004	150				61	39	0	39	22	0	22	61	0	0	61	0
B005	50	0.05			43	25	0	25	18	0	18	43	0	0	43	0
B006	150				33	20	0	20	14	0	14	33	0	0	33	0
B007	50	0.2			136	102	0	102	33	0	33	136	0	0	136	0
B101	Ar	0.05			180	92	11	103	8	69	77	100	80	0	180	0
B102	Ar	0.2			133	75	7	82	8	43	51	83	50	0	133	0
B201	50	0.2			241	92	90	182	1.1	58	59	93	148	0	241	0
B202	150				171	75	58	133	1.2	36	38	76	95	0	171	0
B203	50	0.1			187	43	88	131	0.5	56	56	43	144	0	187	0
B204	150				128	35	57	92	0.6	35	35	35	92	0	128	0
B205	50	0.05			162	21	87	108	0.2	54	55	21	142	0	162	0
B206	150				108	17	57	74	0.3	34	34	17	91	0	108	0
B207	He	0.2			245	89	87	176	1.3	68	69	90	155	0	245	0
B211	0.2	1-4			215	2096	2311	105	218	65	2028	2094	178	0	2311	0
B212	0.1	7-9			155	2051	2206	54	105	158	31	2017	2048	85	2121	2206
B213	50	1-4	0.09	押付圧MPa	128	2020	2148	26	104	130	15	2002	2017	41	2106	2148
B221		0.05			215	3226	3441	113	105	218	78	3144	3223	191	3249	3441
B231		0.2	7-11X		208	4238	4446	120	109	229	119	4098	4217	239	4206	4446
					202	5157	5359	127	113	239	163	4956	5120	290	5069	5359
					215	3469	3684	113	105	218	82	3384	3466	195	3489	3684
					210	4241	4451	118	108	226	112	4114	4225	230	4221	4451

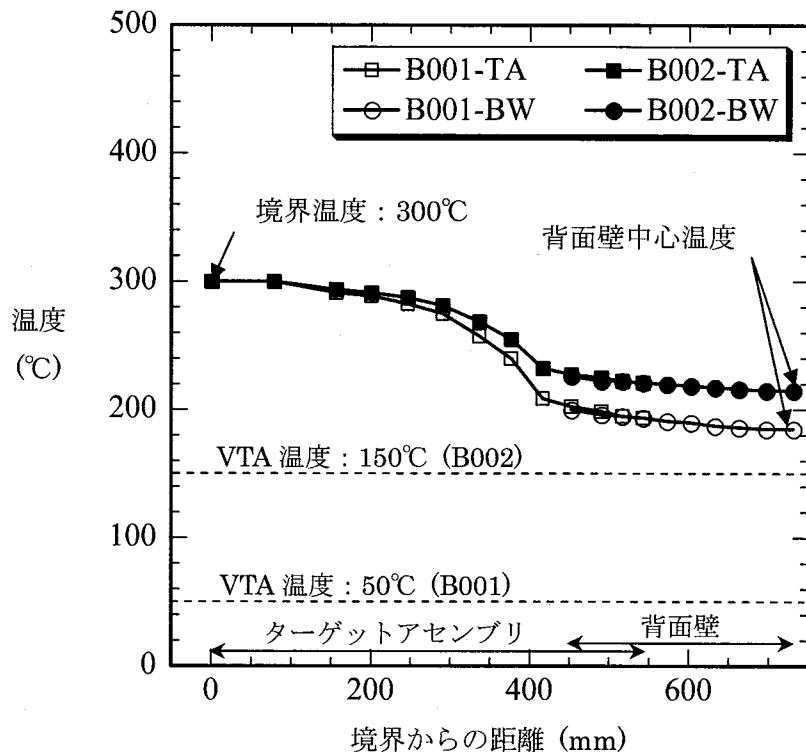


図 3.6 溫度計算結果（真空条件下での VTA 温度の影響）

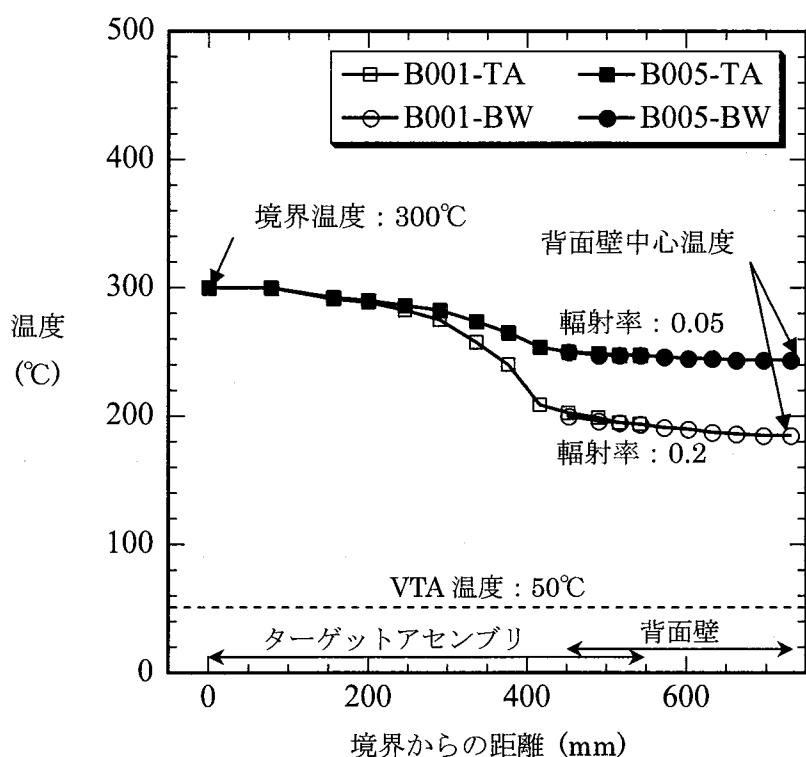


図 3.7 溫度計算結果（真空条件下での輻射率の影響）

### (3) 接触熱抵抗の影響

図 3.8 にアセンブリ-背面壁間の接触部での眞の接触面の面積比が 0.1 (押付圧 31 MPa に相当) の場合(B001)と押付圧 0.09 MPa (接触面積比  $2.9 \times 10^{-4}$  に相当) の場合(B007)の温度を示す。接触部両側要素温度を 300°C と仮定すると、SUS316 热伝導率 18.3 W/m•K (付録 3.4) であるから、接触部はそれぞれ厚さ 3.4 mm(B001)、1.2 m(B007) の热伝導要素と等価である。そのため、B001 ではアセンブリ(TA)要素(⑤, ⑥)中心温度と背面壁(BW)要素(⑦, ⑧)中心温度はほぼ等しいが、B007 では約 40°C の違いがある。また、背面壁中心温度での違いは 24°C である。

ただし、接触部热伝達がケース B007 程度に悪い場合でも、輻射率を 0.05 程度以下に保てば余裕を持って保温条件を満足できる可能性がある。

実際のターゲットでは、アセンブリ交換後の最初のリチウム装荷前を除いて、接触部にリチウムが浸透して热伝達が良くなっていることも有り得るが、保守側の設計としては、合理的に実用可能な押付圧を把握することが必要である。

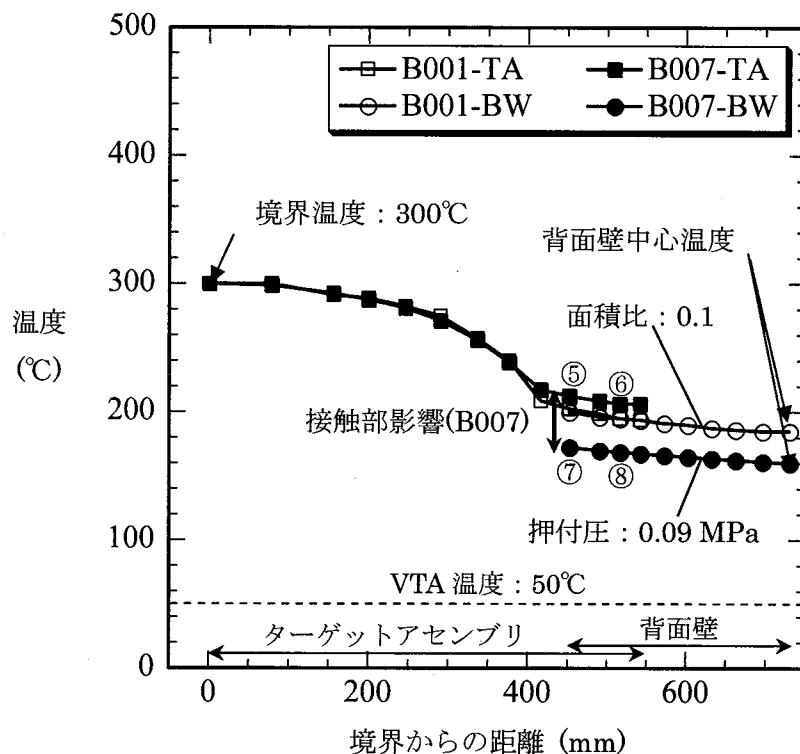


図 3.8 溫度計算結果（真空条件下での接触熱抵抗の影響）

### 3.3.3 アルゴン環境下での温度

真空環境下では要素からの放熱は輻射によるものだけであったが、雰囲気ガスがある環境下ではガスをとおしての要素-VTA 間の熱伝導が加わる。

図 3.9 に真空の場合(B001)と大気圧 Ar 雰囲気の場合(B101)の温度を示す。Ar 雰囲気の場合は境界からの距離に従った温度低下が著しい。図 3.10 に Ar 雰囲気の場合の VTA 温度による影響を示す。背面壁中心温度は 74°C(B101)、161°C(B102)であり、それぞれの VTA 温度に近くなる。これは、アセンブリからの放熱が主に輻射によるもの( $Q_r$ )である一方、VTA に近い(間隙 1.5 mm)背面壁からの放熱が主に Ar を介しての熱伝導によるもの( $Q_c$ )であるからである。 $(Q_r = 8 \text{ W}, Q_c: 43-69 \text{ W}$ 、表 3.4)

よって、Ar 雰囲気条件下では真空の場合のように輻射率低下の効果は望めない。

### 3.3.4 ヘリウム環境下での温度

雰囲気ガスがヘリウムである場合は、その熱伝導がアルゴンの 8 倍以上(20°Cにおける値、付録 2.2、2.3)であるため、ガスをとおしての要素-VTA 間の熱伝導の影響がさらに大きくなる。

図 3.11 に真空の場合(B007)と 0.09 MPa-He 雰囲気の場合(B201)の温度を示す。He 雰囲気の場合も境界からの距離に従った温度低下が著しい。図 3.12 に示すように背面壁(BW)全体にわたってその温度は VTA 温度に近くなる。この傾向は輻射率を変化させた場合(図 3.13)、接触熱抵抗を変えた場合(図 3.14)でも同様で、アセンブリ(TA)の温度では条件により最大 30°C の差が生ずるが、背面壁温度ではこれら条件による差は 5°C 以内である。特に背面壁中心温度は VTA 温度と 1°C も差がない。(B201-B207、表 3.3)。He 雰囲気の場合は、Ar 雰囲気の場合にも増して、背面壁からの放熱が主に He を介しての熱伝導によるものであるからである。 $(Q_r: 0.2-1.3 \text{ W}, Q_c: 34-68 \text{ W}$ 、表 3.4)

よって、Ar 雰囲気条件の場合以上に輻射率低下、接触熱抵抗低下の効果は望めない。保温条件を満足するためには背面壁の温度に重点を置いた別の方策が必要である。

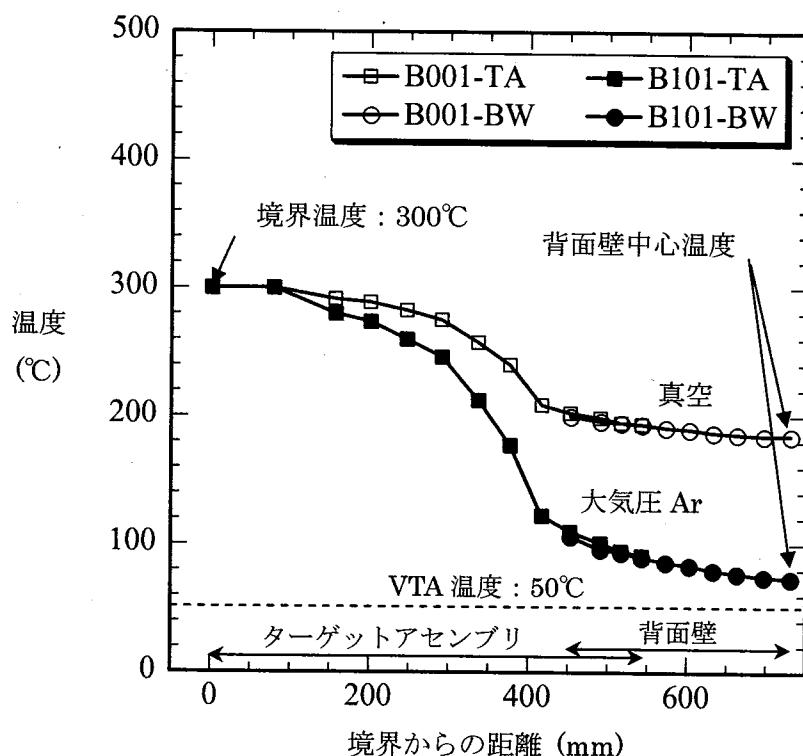


図 3.9 溫度計算結果（真空と Ar の差異の影響）

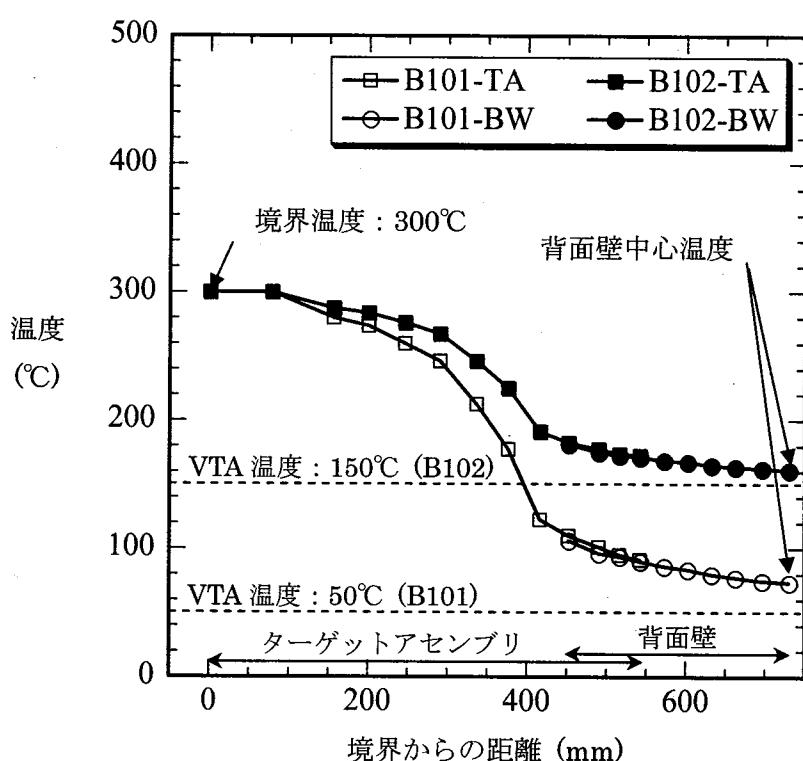


図 3.10 溫度計算結果（Ar 条件下での VTA 温度の影響）

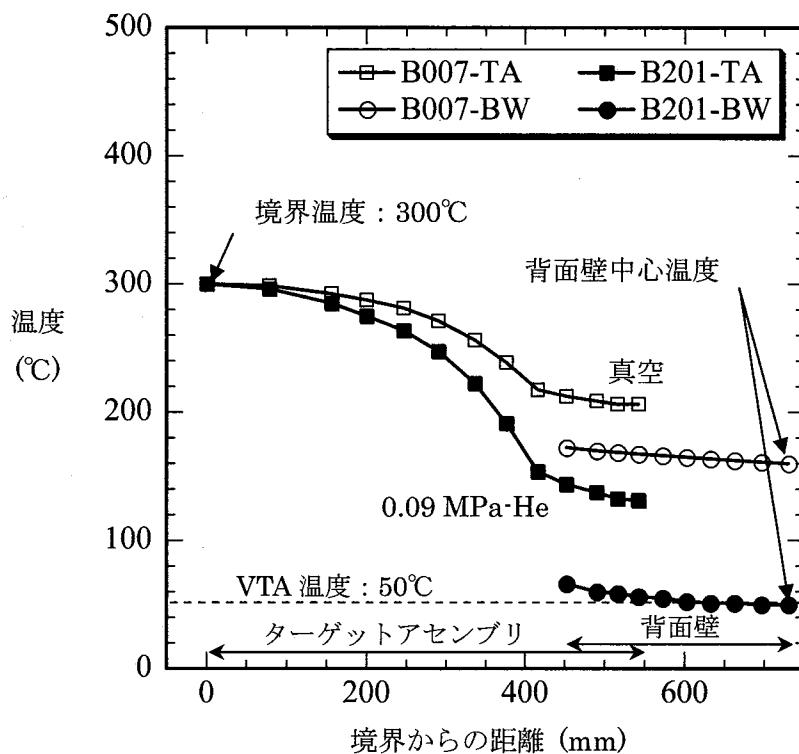


図 3.11 溫度計算結果（真空と He の差異の影響）

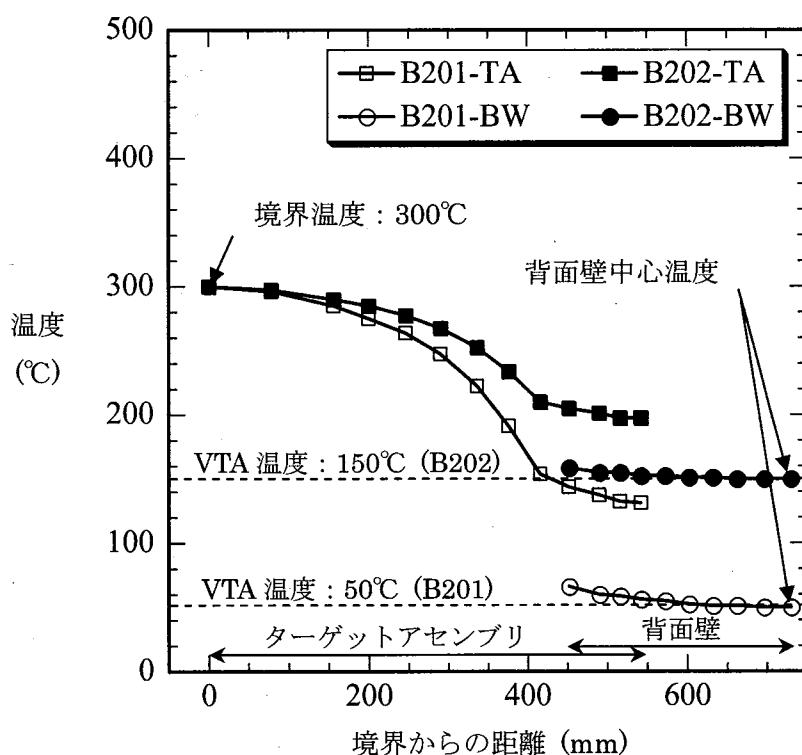


図 3.12 溫度計算結果（He 条件下での VTA 温度の影響）

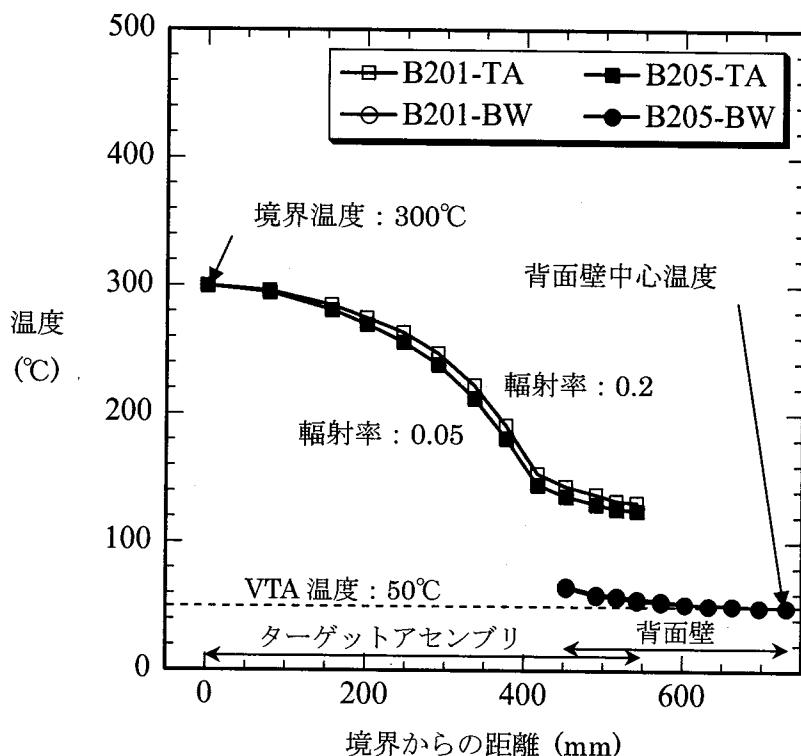


図 3.13 温度計算結果 (He 条件下での輻射率の影響)

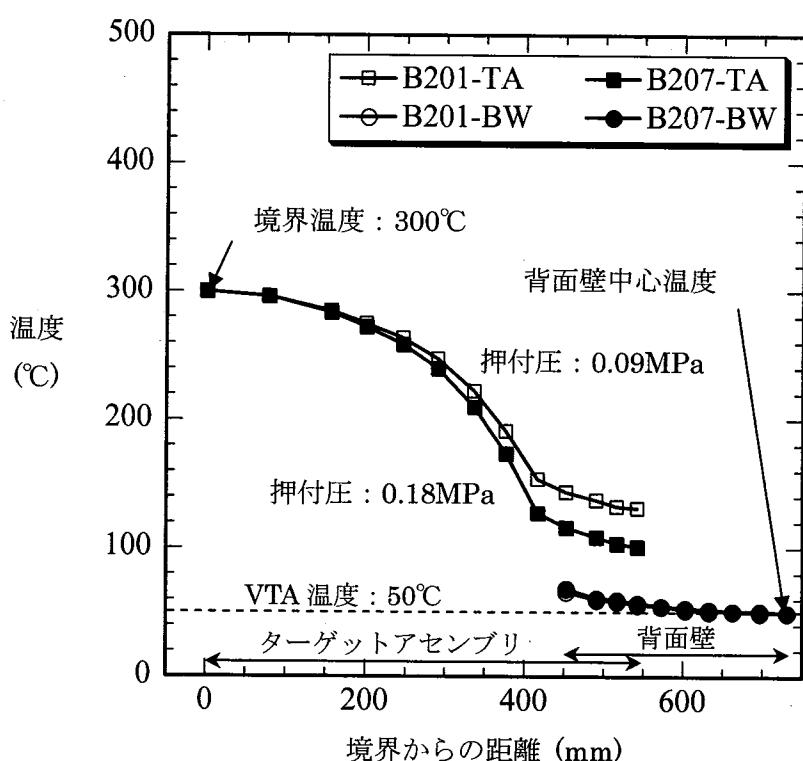


図 3.14 温度計算結果 (He 条件下での接触熱抵抗の影響)

### 3.3.5 背面壁へのヒーター施工

雰囲気ガスがある環境下では輻射率、接触部熱抵抗を改善しても、背面壁-VTA間のガスを介しての熱伝導により、背面壁温度がVTA温度程度に低下する。そこで、He雰囲気条件下で、ヒーターの施工範囲をターゲットアセンブリだけでなく背面壁にまで拡張した。拡張範囲は3.1.1(4)示した3通りであり、それぞれ以下のような結果となった。

#### (1) 要素⑦-⑨にヒーター施工した場合

図3.15にアセンブリのみにヒーター施工した場合(B201)と背面壁要素のうち⑦-⑨にも施工した場合(B211)の温度を示す。図3.15でのB211はアセンブリ温度が300°C以下になるようにヒーター入熱を2.3 kWにした場合のものである。このうちほとんど(2.1 kW)は背面壁ヒーターによるものである。(表3.4)また、背面壁への入熱と背面壁からの放熱の差は3 W以下(B211-B213)であるので、背面壁へのヒーター入熱が2.1 kWのとき、アセンブリ-背面壁の熱移動はほぼ平衡状態である。

ヒーターが施工されている背面壁要素⑦-⑨の温度は目標値200°C以上となるが、施工されていない背面壁要素⑩-⑪で温度は急激に低下し、背面壁中心温度は72°Cである。(ただし、要素⑦中心温度は365°Cまで上昇している。)これらのことから、さらに背面壁中心温度を目標値にするには、その中に近い位置にヒーターを施工する必要がある。

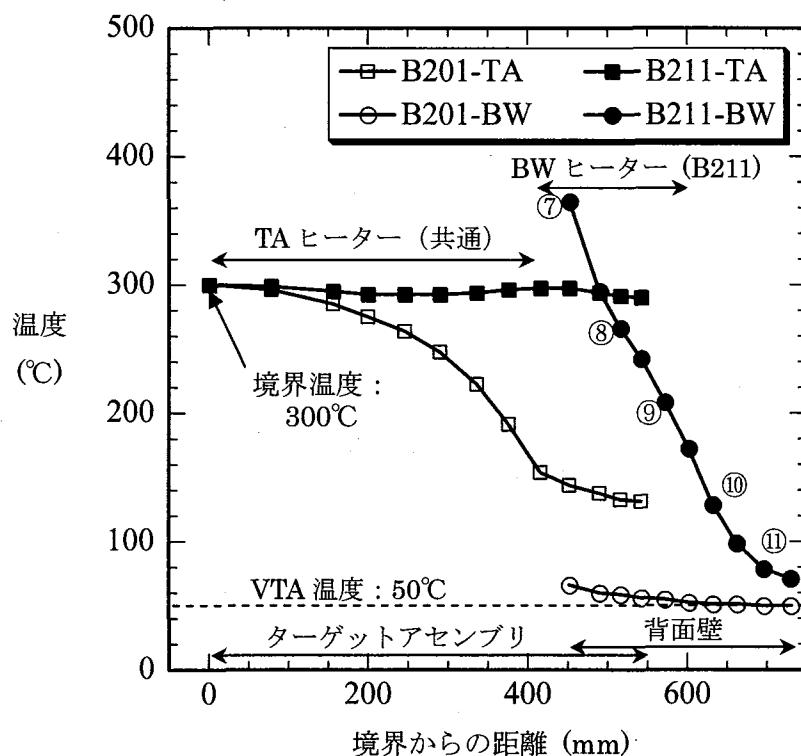


図3.15 温度計算結果 (He条件下でのヒーター施工範囲拡大⑨)

## (2) 要素⑦-⑪X にヒーター施工した場合

ヒーター施工範囲をさらに拡大し、要素⑪の上半分⑪Xまでとした場合(B221)の温度を図3.16に示す。背面壁へのヒーター入熱を3.2 kW程度(B221(1))、アセンブリも含めると3.4 kW)とするとアセンブリ温度を300°C以下に抑えられるが、背面壁温度はヒーター施工範囲の下端要素⑪Xあたりから急激に低下し、背面壁中心では147°Cである。この温度は前ケース(B211)よりも上昇したもののみならずである。

背面壁へのヒーター入熱を5.2 kW程度(B221(3))、アセンブリも含めると5.4 kW)まで増加させてようやく背面壁中心温度は196°Cとなり目標値に近くなるが、そのとき背面壁最高温度は480°C、アセンブリ最高温度は370°Cとなり、高温への配慮(変形、変質)が新たに設計検討に必要となる。背面壁内の局所的な高温を回避するには、さらに背面壁全体に均一にヒーター入熱を与える必要がある。

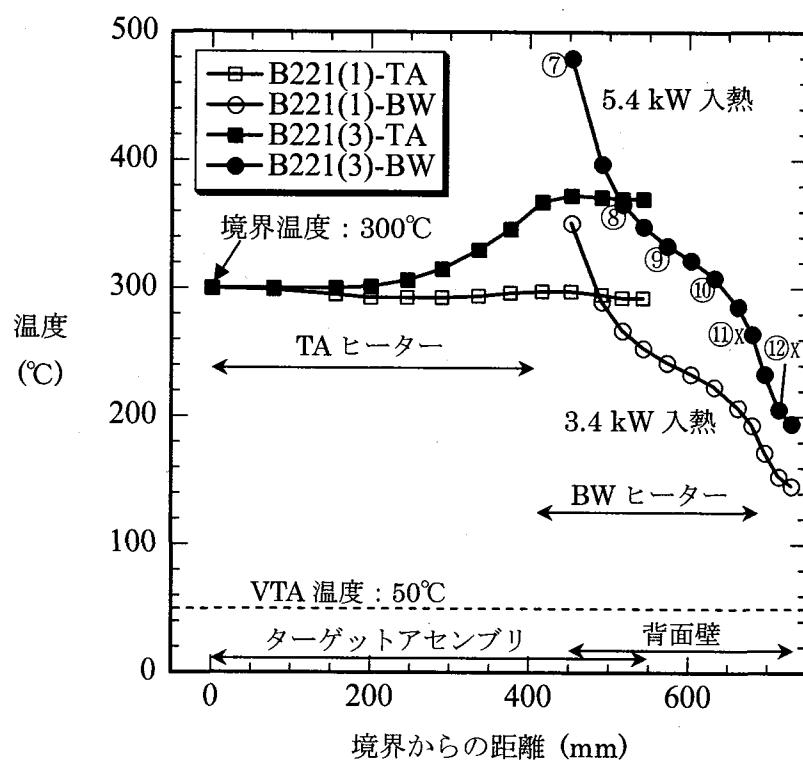


図 3.16 溫度計算結果 (He 条件下でのヒーター施工範囲拡大⑪X)

## (3) 要素⑦-⑪Yにヒーター施工した場合

ヒーター施工範囲をさらに拡大し、要素⑪のうちビームフットプリント付近⑫Y以外の⑪Yまでとした場合(B231)の温度を図3.17に示す。背面壁へのヒーター入熱を4.2 kW程度(B231(2)、アセンブリも含めると4.5 kW)とすると背面壁中心温度は212°Cとなり目標値を超え、そのとき背面壁最高温度も400°C程度に抑えられる。

ただし、そのときの背面壁ヒーターの発熱密度は $2.9 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ にも達し、アセンブリ部分での発熱密度 $1.1 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ に比べはるかに大きな値となる。この発熱密度は前ケースでも $2.7 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ (B211)、 $3.8 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ (B221(3))であり、一般的なヒーター発熱密度が数千 $\text{W/m}^2$ (主にヒーター線の必要曲げ半径による)であることを考慮すると、新たな高密度ヒーターの検討または施工方法の検討が必要となる。

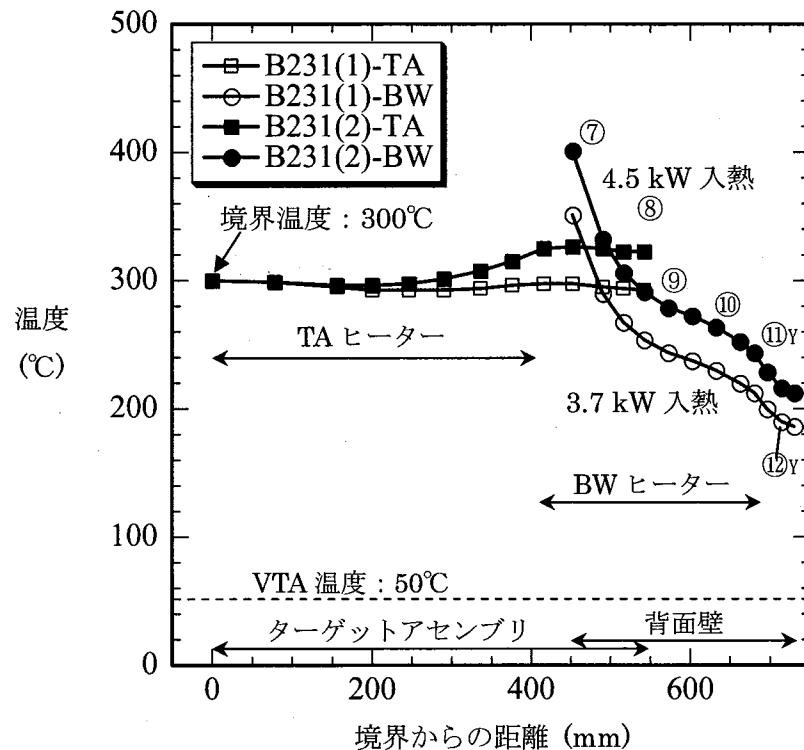


図 3.17 温度計算結果 (He 条件下でのヒーター施工範囲拡大⑪Y)

#### 4. 加熱ヒーター容量の評価

2章および3章の結果を踏まえ、保温構造（熱遮蔽体）の有る部分および無い部分を含めたターゲットアセンブリ（背面壁を含む）を最大温度 300°Cまで加熱／温度維持可能なヒーターの容量（電力）を評価した。

##### 4.1 検討条件

###### 4.1.1 検討対象

検討対象である加熱／温度維持すべき物体は以下の 2 点であるとした。

###### (1) ターゲットアセンブリ（背面壁を含む）

アセンブリおよび背面壁の材質は SUS316 であり、その合計質量(MTG) 971 kg の内訳は、アセンブリ質量(MTA) 846 kg、背面壁質量(MBW) 125 kg であるとした。

###### (2) 热遮蔽体

2章の結果、セラミックファイバー製の保温層よりもステンレス鋼板を重ねた熱遮蔽体のほうが良い性能を有していることが分かったので、本章では保温構造体として熱遮蔽体のみを対象とし、計算上以下の仕様であるとした。

長さ：

アセンブリを質量が等価な 10B-Sch40 配管（単位長さ質量：59.2 kg/m）とみなし、その長さ(L)は以下のとおりであるとした。

$$L = MTA / (59.2 \text{ kg/m}) = 14.3 \text{ m}$$

質量：

熱遮蔽板は厚さ 0.2mm の SUS316 の薄板であるとした。また、熱遮蔽体層の円筒を支持するサポートは、円筒構造と同じ重量とした。2章で示したようにテストセル室雰囲気条件により必要な熱遮蔽板の枚数が異なり、サポートを含む熱遮蔽体の質量(MTS)は以下のとおりとなる。(記号については表 4.2 で説明)

$$\begin{aligned} MTS &= 2 \sum (\pi \cdot d_i \cdot L \cdot t \cdot \rho) = && 828 \text{ kg } (\text{真空、ケース A20, i:1-16}) \\ &&& 892 \text{ kg } (\text{Ar、ケース A21, i:1-17}) \\ &&& 2757 \text{ kg } (\text{He、ケース A22, i:1-40}) \end{aligned}$$

ここで、熱遮蔽体の i 番目の層の径(di)は以下の値をとる。

$$d_i = i \cdot 10 \text{ mm} + 277.4 \text{ mm}$$

#### 4.1.2 溫度条件

以下の2条件を同時に満たすヒーター容量を計算にて求めた。

##### (1) 昇温条件

ターゲットアセンブリ：

リチウム装荷前のアセンブリを5時間で0°Cから300°Cまで加熱するとし、その昇温速度は60 K/hとした。なお、昇温分に必要なヒーター容量の計算では、アセンブリ全体に熱遮蔽体と加熱ヒータが施工されていて均一に昇温されたとした。

##### 熱遮蔽体

サポートを含む熱遮蔽体を5時間で平均温度0°Cから150°Cまで加熱するとし、熱遮蔽体の昇温速度は30 K/hとした。

##### (2) 溫度維持条件

ターゲットアセンブリが300°Cに到達した後の、リチウム装荷前のアセンブリ内が空の状態時における加熱ヒーター容量を計算した。加熱ヒーターは、この300°C維持状態時におけるアセンブリからの放熱量分に相当する電力を供給することにより、300°C一定に維持される。放熱量は、非保温施工部の背面壁およびその近傍も含むアセンブリ全体を対象とした。

##### (3) 昇温中の放熱量

ターゲットアセンブリの昇温中の放熱量は、温度依存の複雑な関数にて近似されるが、ここでは保守側の設計として、アセンブリ温度が300°Cのものを用いた。

#### 4.1.3 物性値

ターゲットアセンブリおよび熱遮蔽体の材質はSUS316であり、その密度( $\rho$ )および比熱(C)は温度によらず以下の値であるとした。

$$\rho = 7.95 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$C = 5.50 \times 10^2 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

#### 4.1.4 検討ケース

それぞれのテストセル室雰囲気条件に対応して、なるべく保温条件を満たした以下のケースを組み合わせた。

表 4.1 ヒーター容量計算ケース

テストセル室雰囲気	保温部ケース	非保温部ケース
真空	A20 (放熱： 46 W/m)	B003 (放熱： 79 W *)
大気圧 Ar	A21 (放熱： 130 W/m)	B101 (放熱： 241 W *)
0.09 MPa-He	A22 (放熱： 396 W/m)	B231 (放熱： 4451 W *)

\* 上下対称モデルのため、全体の1/2に対する値である。

## 4.2 計算方法

### 4.2.1 記号説明

表 4.2 ヒーター容量計算記号一覧

$Q_H$	: 必要な全ヒーター容量 ( $QTG + QTS + QLA + QLB$ )
$QTG$	: ターゲットアセンブリおよび背面壁の昇温に必要なヒーター容量
$QTS$	: 热遮蔽体およびサポートの昇温に必要なヒーター容量
$QLA$	: 保温部からの放熱量 (2章の計算結果参照)
$QLB$	: 非保温部からの放熱量 (3章の計算結果参照)
$MTG$	: ターゲットアセンブリおよび背面壁の質量 ( $MTA + MBW$ )
$MTA$	: ターゲットアセンブリの質量
$MBW$	: 背面壁の質量
$MTS$	: 热遮蔽体およびサポートの質量 (热遮蔽体質量の2倍)
$L$	: ターゲットアセンブリ本体の热遮蔽体長さへの換算値 (14.3 m)
$di$	: 热遮蔽体の $i$ 番目の層の径 ( $i \cdot 10 \text{ mm} + 277.4 \text{ mm}$ )
$t$	: 热遮蔽体の各層の板厚 (0.2 mm)
$\rho$	: ターゲットアセンブリおよび热遮蔽体の密度 ( $7.95 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )
$C$	: ターゲットアセンブリおよび热遮蔽体の比熱 ( $5.50 \times 10^2 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ )
$\Delta TTG$	: ターゲットアセンブリおよび背面壁の上昇温度 (300 K)
$\Delta TTS$	: 热遮蔽体の上昇温度 (150 K)
$T$	: 升温所要時間 ( $1.8 \times 10^4 \text{ s}$ )

### 4.2.2 ヒーター容量計算方法

4.1 で述べた条件に基づき、以下のように計算した。

(1) ターゲットアセンブリおよび背面壁の昇温に必要な電力 :  $QTG$

$$QTG = MTG \cdot C \cdot \Delta TTG / T$$

(2) 热遮蔽体およびサポートの昇温に必要な電力 :  $QTS$

$$QTS = MTS \cdot C \cdot \Delta TTS / T$$

(3) 保温部からの放熱量 :  $QLA$

2章では単位長さの保温構造体について計算したので、 $QLA$  は表 4.1 の値に热遮蔽体の長さ  $L$  を乗じた値となる。

(4) 非保温部からの放熱量 :  $QLB$

3章では上下対象モデルを用いて計算したので、 $QLB$  は表 4.1 の値を 2倍した値となる。

(5) 必要なヒーター容量 :  $QH$

昇温分と放熱分との合計の値とした。

$$QH = QTG + QTS + QLA + QLB$$

### 4.3 計算結果および考察

表 4.3 に必要なヒーター容量をまとめた。それぞれのテストセル室雰囲気条件に対応したヒーター容量と課題について以下に述べる。

#### 4.3.1 真空条件でのヒーター容量

真空条件では、必要なヒーター容量は 14 kW であり、そのうち昇温のためのヒーター容量(QTG + QTS)が主であり、放熱分(QLA + QLB)は 1 kW 以下である。昇温時間(5 h)を長くとれるならば、必要なヒーター容量をさらに小さくできる。非保温部からの放熱(QLB)は全体の 1%以下であるので、接触部の熱抵抗や輻射率が良くない場合でも必要なヒーター容量の値はほとんど変わらないと思われる。必要な熱遮蔽板枚数は 16 であり、サポートを含めた熱遮蔽体の質量がターゲットアセンブリ程度になるので、より軽量な熱遮蔽材の検討が、現実的な設計に向けて必要である。

#### 4.3.2 Ar 条件でのヒーター容量

大気圧 Ar 条件下では、非保温部温度は 3 章での検討ケースでは 200°C 以上にならなかったので、正確な予測ができないが、20-300°C の温度範囲では He の熱伝導率は Ar の熱伝導率の 8.29-8.66 倍(付録 2.2、2.3) であるので、Ar 条件下でケース B231 のようなヒーターを施工し、背面壁温度を 200°C 以上にしたときの放熱(QLB)は、 $1.07 \text{ kW} (= 8.90 \text{ kW} / 8.29)$  であり、必要なヒーター容量は 16 kW であると推測できる。必要な熱遮蔽板枚数は 17 であり、より軽量な熱遮蔽材の検討に加えて背面壁ヒーターの検討が現実的な設計に向けて必要である。

#### 4.3.3 He 条件でのヒーター容量

0.09 MPa-He 条件では、大きな熱伝導率のため保温部、非保温部とも放熱が大きくなり、必要なヒーター容量は 36 kW にも達する。必要な熱遮蔽板枚数も 40 枚と多くなるので昇温のためのヒーター容量も大きくなり、サポートを含めた熱遮蔽体の質量がアセンブリの 3 倍程度となり、これも軽量化が必要である。また、非保温部のヒーター敷設も検討課題となる。

表 4.3 必要ヒーター容量および内訳 (単位 : kW)

テストセル室雰囲気	真空	大気圧 Ar	0.09 MPa-He
アセンブリおよび背面壁の昇温に必要な電力(QTG)	8.90	8.90	8.90
熱遮蔽体およびサポートの昇温に必要な電力(QTS)	3.80	4.09	12.64
保温部からの放熱量(QLA)	0.66	1.86	5.66
非保温部からの放熱量(QLB)	0.16	(1.07)	8.90
必要なヒーター容量(QH)	13.52	(15.92)	36.10

## 5. まとめおよび今後の課題

### 5.1 まとめ

背面壁およびターゲットアセンブリの温度を 200°C以上に保持する条件を明らかにするため実施した熱解析および必要なヒーター容量の検討の結果は以下のとおりである。

#### 5.1.1 ターゲットアセンブリ保温構造

ターゲットノズルより上流の保温構造体を施工できる部分の熱解析の結果、以下のことが判明した。

- (1) ターゲットアセンブリの保温構造体としては、セラミックファイバーの保温層を用いるよりもステンレス鋼板の多層熱遮蔽体を用いるほうがコンパクトなものとなる。例えば、真空条件下では、保温層の必要厚さが 327 mm であるのに対し、熱遮蔽体の必要厚さは 75 mm (16 層) である。
- (2) 热遮蔽板の輻射率を小さくすることで熱遮蔽体を構成する鋼板の必要枚数を減らせる。特に真空条件下ではこの効果が大きく、輻射率を 0.05 以下とすれば、必要枚数を 5 (熱遮蔽体の厚さ 20 mm) にできる。テストセル室がガス (Ar, He) で満たされている場合は、熱移動が主にガスの熱伝導に支配されるため、輻射率を小さくしても、熱遮蔽板の必要枚数は Ar 霧囲気条件では 12、He 霧囲気条件では 38 である。

#### 5.1.2 背面壁およびその近傍の保温条件

保温構造体を施工できない、背面壁およびその近傍のターゲットアセンブリの熱解析の結果、以下のことが判明した。

- (1) 最も温度が低くなるのは、ヒーター施工が困難な背面壁中心の温度であり、ここの温度を保持することが重要となる。
- (2) 真空条件下では、背面壁ーアセンブリの熱接触が良く（接触面積比 0.1 以上）かつ輻射率が 0.1 程度以下であるならば、アセンブリのみにヒーター施工しても背面壁中心温度を 216°C 以上にできる。
- (3) テストセル室がガス (Ar, He) で満たされている場合は、背面壁ー垂直テストアセンブリ (VTA) 間の間隙 1.5 mm での熱伝導が大きく、熱接触や輻射率の効果はほとんど望めない。ターゲットアセンブリのみにヒーター施工しただけでは、背面壁中心温度はリチウム融点 (180°C) 以下である。特に、熱伝導率が Ar の 8 倍以上ある He の場合、背面壁中心温度は VTA 温度と 1 K も差がない。
- (4) ガス霧囲気 (Ar, He) 条件下で背面壁温度を 200°C 以上にするには背面壁中心のビームフットプリントに極力近い位置までヒーターを施工し、かつ、大きなヒーター入熱を与える必要がある。例えば、He 条件下での背面壁ヒーター容量は 8.9 kW 必要である。

### 5.1.3 加熱ヒーター容量

上記温度維持に加え、ターゲットアセンブリを5時間で300°C（熱遮蔽体の平均温度は150°C）まで昇温するに必要なヒーター容量は以下のとおりである。

- (1) 真空条件下では、放熱量が1kW以下であり、必要ヒーター容量14kWの大部分はアセンブリ(0.97t)および熱遮蔽体(0.83t)を昇温するために費やされる。
- (2) ガス雰囲気(Ar、He)条件下では、必要なヒーター容量は約16kW(Ar)および36kW(He)である。特にHe条件下では、熱遮蔽体(サポートを含む)の質量が2.8tにも達し、この昇温のためのヒーター容量が13kWも必要である。

### 5.2 今後の課題

今回の検討はリチウム装荷前に、背面壁付近の温度が200°C以上、その他のターゲットアセンブリの温度が300°Cに維持するという設計条件に沿ったものである。今後の主要な検討課題を以下に示す。

- (1) より軽量、コンパクトで高性能な保温材・熱遮蔽材の検討
- (2) 現実的な背面壁押付圧およびその機構の検討
- (3) 高い発熱密度の背面壁ヒーターの検討
- (4) リチウム装荷前の雰囲気ガスを熱伝導が相対的に小さいArとし、リチウム循環後にHeに置換する等の運転シナリオの検討
- (5) 背面壁一体型ターゲットアセンブリの成立性・利害特質の検討
- (6) 背面壁-アセンブリ間の隙間へのリチウム浸透およびそのときの接触部熱伝達の検討

### 参考文献

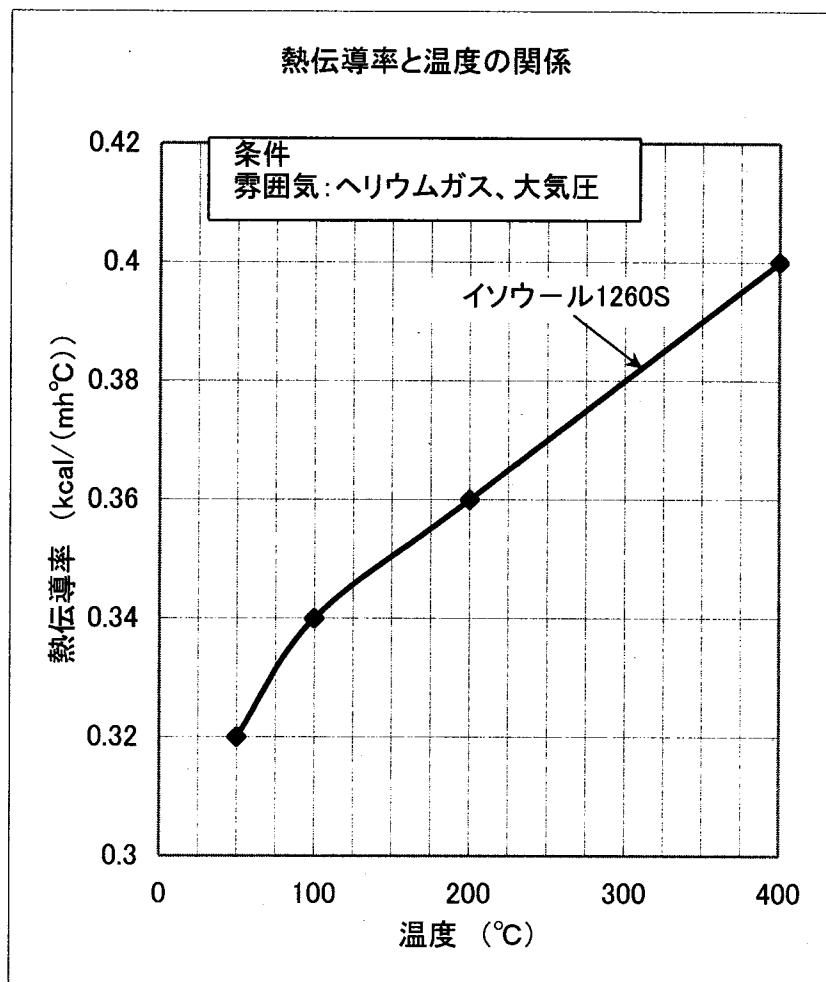
- [2.1] イソウール1260Sデータ、イソライト工業(株)技術資料
- [2.2] 保温保冷工事施工標準、JIS A9501-2000、日本規格協会
- [2.3] 伝熱工学資料改訂第4版、p328、日本機械学会
- [2.4] Harth, R. and Hammeke, K : JUL-666-RB (1970)
- [3.1] 伝熱工学資料 改訂第4版、p30、日本機械学会
- [3.2] ASME Sec. II Part D subpart2 Table TCD

## 付録2.1 セラミックファイバの熱伝導率

セラミックファイバ：イソホール1260S [イソライト工業(株)製]

条件：ヘリウム100%雰囲気、1atm

温度	°C	50	100	200	400
熱伝導率	kcal/(mh°C)	0.32	0.34	0.36	0.4



## 付録2.2 大気圧下のアルゴンガスの物性値

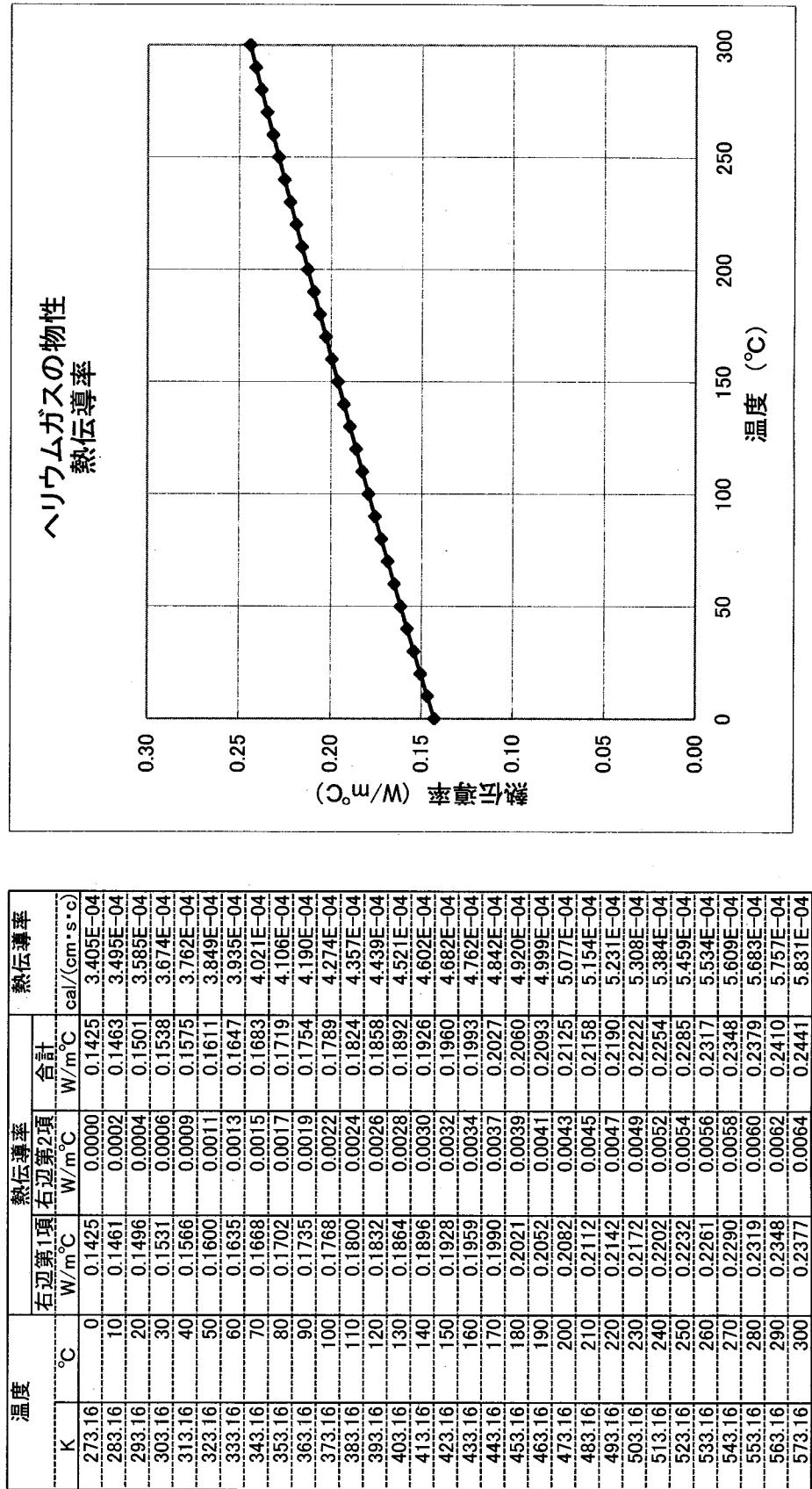
温度 T K	密度 $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	定圧比熱 $C_p$ kJ/(kg·K)	粘性率 $\eta$ μPa·s	動粘性率 $\nu$ mm <sup>2</sup> /s	熱伝導率 $\lambda$ mW/(mK)	熱拡散率 a mm <sup>2</sup> /s	プラントル数 Pr	備考
2900.0	-73.2	2441.1	0.5236	15.99	6.55	1260	9.86	0.664
293.2	20.0	1.6793	0.5216	22.25	13.48	17.33	20.1	0.670
298.2	25.0	1.6384	0.5215	22.59	13.86	17.58	20.7	0.670
300.0	26.8	1.6237	0.5215	22.71	13.99	17.67	20.9	0.670
303.2	30.0	1.6107	0.5215	22.91	14.30	17.82	21.4	0.670
308.2	35.0	1.5904	0.5215	23.22	14.79	18.05	22.1	0.670
313.2	40.0	1.5700	0.5214	23.53	15.28	18.28	22.8	0.671
318.2	45.0	1.5497	0.5214	23.84	15.77	18.52	23.5	0.671
323.2	50.0	1.5293	0.5214	24.15	16.26	18.75	24.2	0.671
400.0	126.8	1.2170	0.5209	28.91	23.76	22.32	35.2	0.675
423.2	150.0	1.1605	0.5209	30.13	26.39	23.31	39.2	0.674
448.2	175.0	1.0996	0.5208	31.44	29.22	24.37	43.5	0.672
473.2	200.0	1.0388	0.5208	32.75	32.05	25.44	47.8	0.671
500.0	226.8	0.9735	0.5207	34.16	35.09	26.58	52.4	0.669
523.2	250.0	0.9358	0.5207	35.26	38.08	27.48	57.0	0.668
548.2	275.0	0.8953	0.5206	36.45	41.30	28.46	61.9	0.667
573.2	300.0	0.8547	0.5206	37.64	44.52	29.43	66.9	0.665
600.0	326.8	0.8112	0.5205	38.81	47.97	30.48	72.2	0.664

出典：日本機械学会「伝熱工学資料 改訂第4版」の、V.物性編 9.常圧下の気体の物性値より

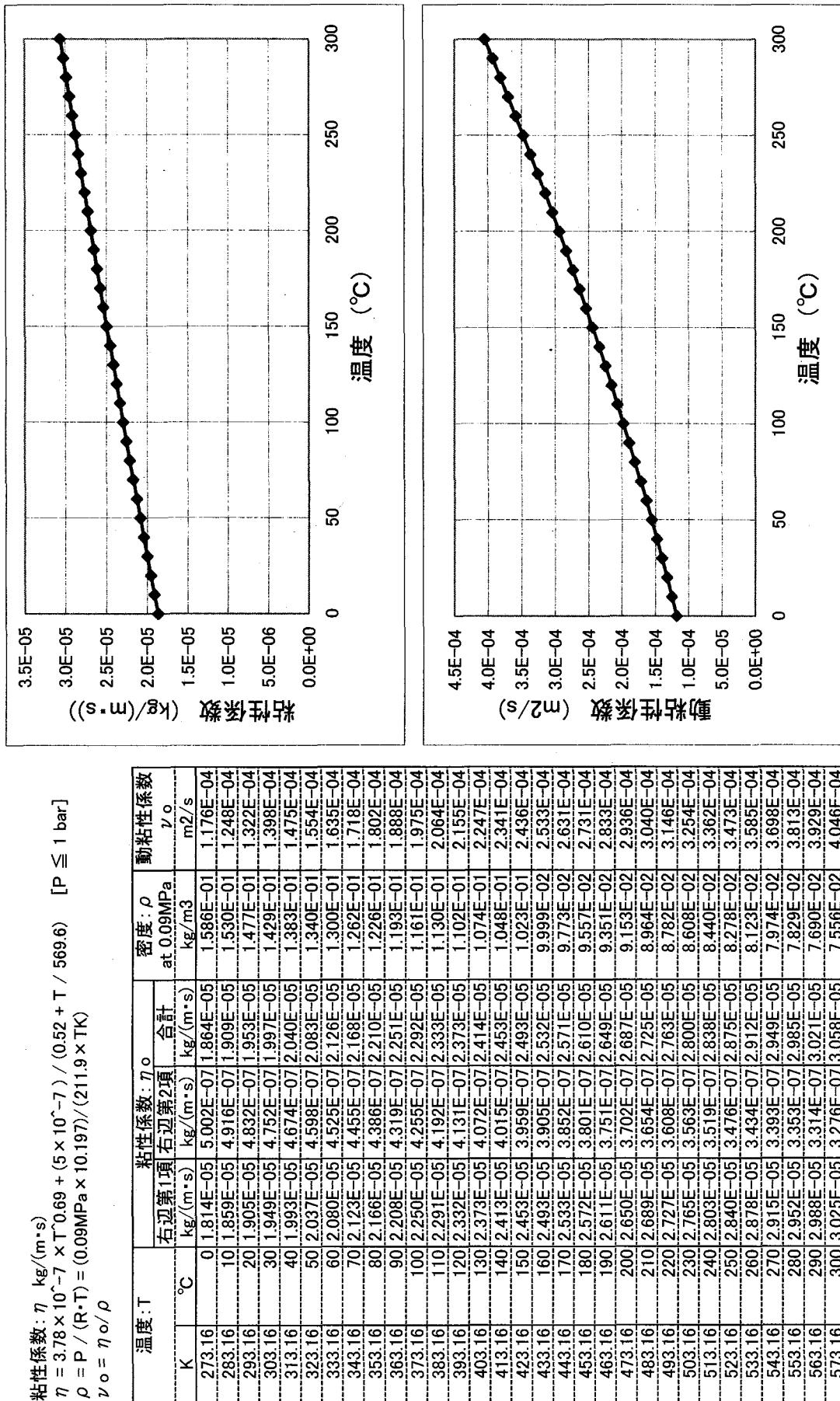
\* 物性値は直線補間にて求めた。

## 付録2.3(1) ヘリウムガスの物性(熱伝導率)

$$k = 0.00297 \times T^{0.69} + (9.23 \times 10^{-9} \times (T - 273.16)^5 + 4.29 \times 10^{-14}) \quad [P \leq 1 \text{ bar}]$$



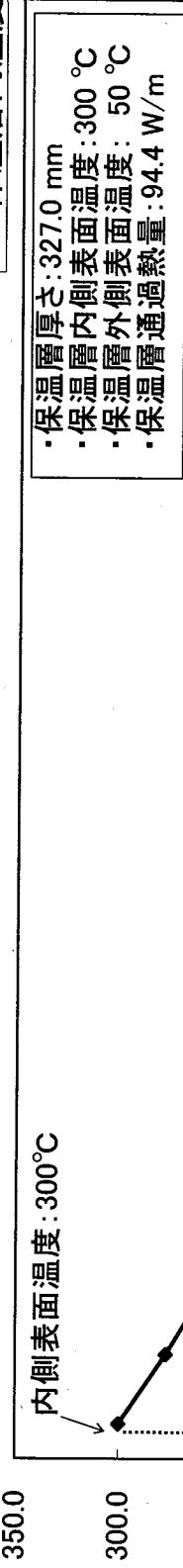
## 付録2.3(2) ヘリウムガスの物性(密度、粘性係数)



保溫層内位置	mm	0.0	16.4	32.7	49.1	65.4	81.8	98.1	114.5	130.8	147.2	163.5	179.9	196.2	212.6	228.9	245.3	261.6	278.0	294.3	310.7	327.0
半径	mm	143.7	160.1	176.4	192.8	209.1	225.5	241.8	258.2	274.5	290.9	307.2	323.6	339.9	356.3	372.6	389.0	405.3	421.7	438.0	454.4	470.7
保溫層内温度	°C	300.0	277.3	256.8	238.1	219.4	199.1	176.6	163.6	151.4	139.9	129.0	118.6	108.7	99.2	90.2	81.5	73.2	65.2	57.4	50.0	

付録2.4(1) 保溫層の温度分布 (Case-A10: 真空)

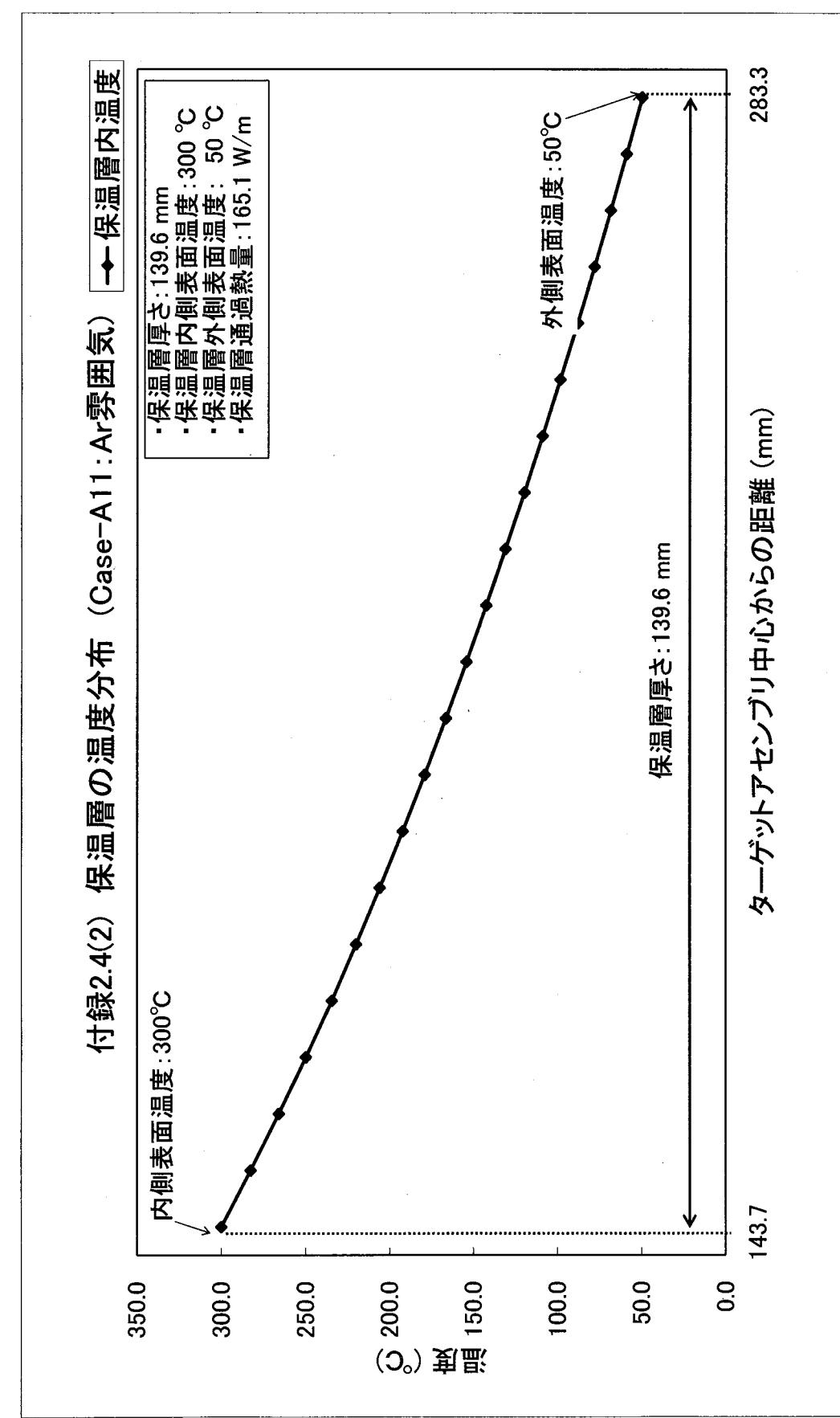
◆ 保溫層内温度



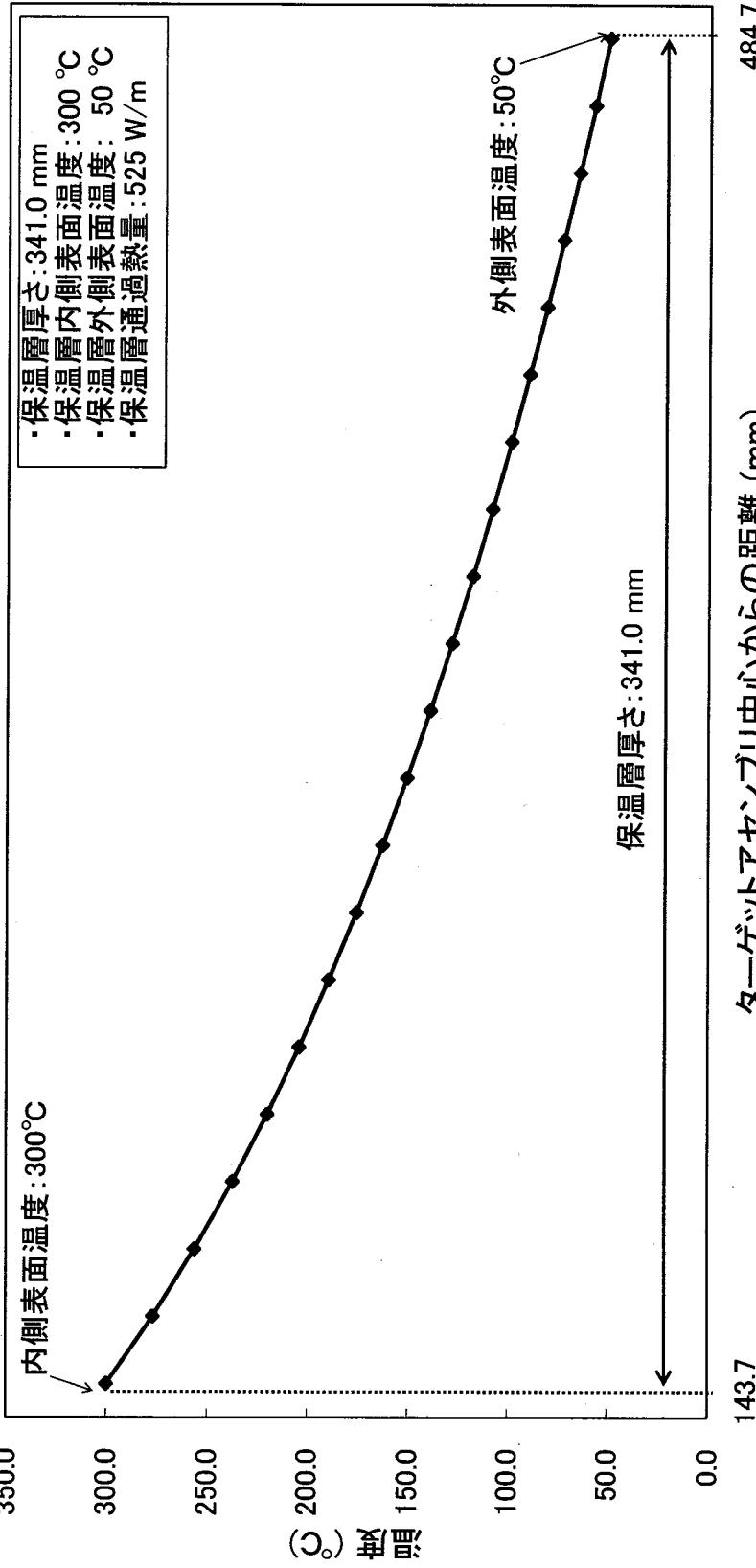
ターゲットアセンブリ中心からの距離 (mm)  
143.7 470.7

保溫層内位置 mm	0.0	7.0	14.0	20.9	27.9	34.9	41.9	48.9	55.8	62.8	69.8	76.8	83.8	90.7	97.7	104.7	111.7	118.7	125.6	132.6	139.6
半径 mm	143.7	150.7	157.7	164.6	171.6	178.6	185.6	192.6	199.5	206.5	213.5	220.5	227.5	234.4	241.4	248.4	255.4	262.4	269.3	276.3	283.3
保溫層内温度 °C	300.0	282.5	265.9	249.9	234.6	219.9	205.8	192.2	179.1	166.4	154.2	142.3	130.9	119.7	108.9	98.4	88.2	78.3	68.6	59.2	50.0

付録2.4(2) 保溫層の温度分布 (Case-A11 : Ar雰囲気) ← 保溫層内温度

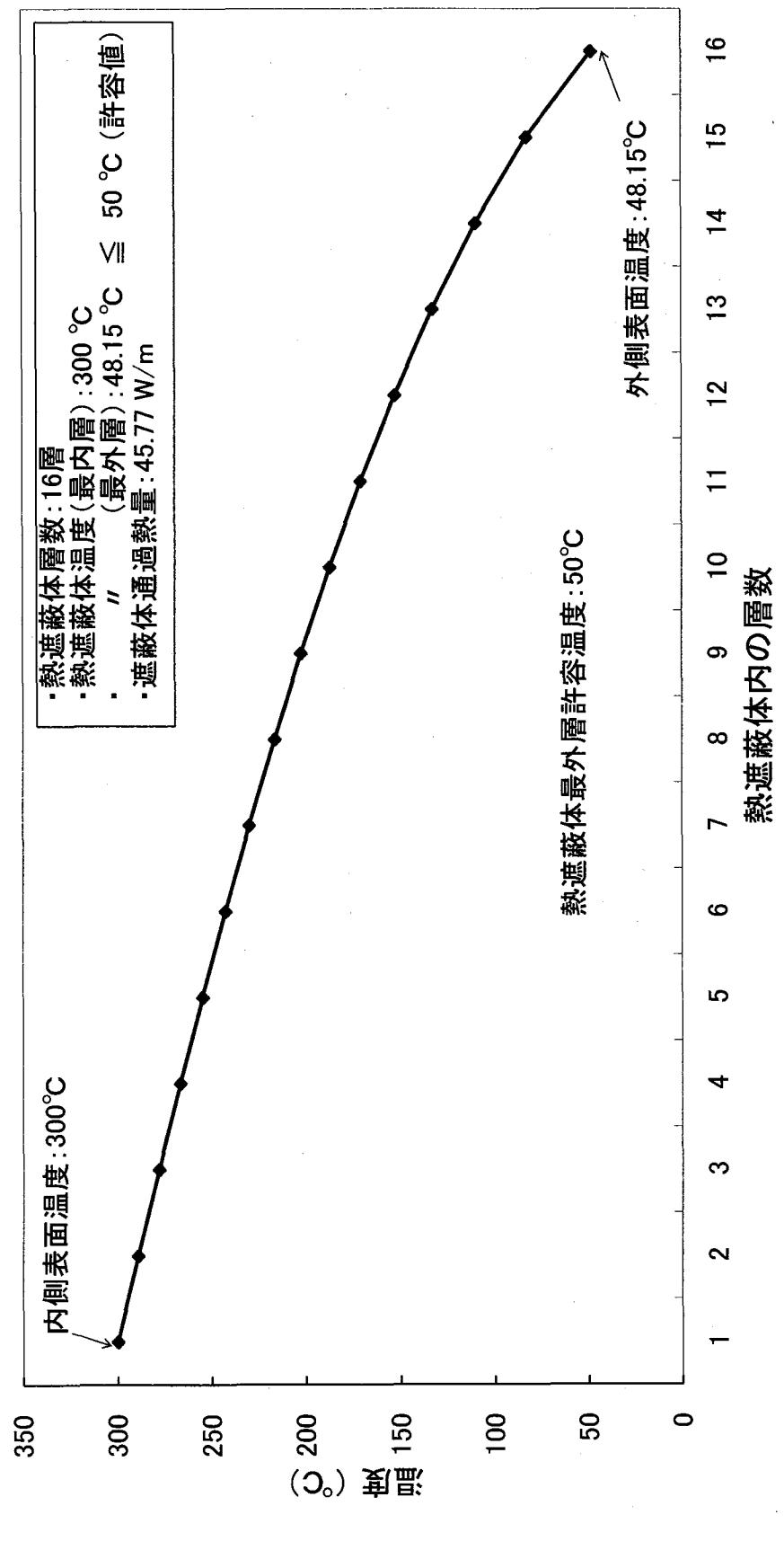


保温層内位置 半径	mm	0.0	17.1	34.1	51.2	68.2	85.3	102.3	119.4	136.4	153.5	170.5	187.6	204.6	221.7	238.7	255.8	272.8	289.9	306.9	324.0	341.0
保温層内温度	°C	143.7	160.8	177.8	194.9	211.9	229.0	246.0	263.1	280.1	297.2	314.2	331.3	348.3	365.4	382.4	399.5	416.5	433.6	450.6	467.7	484.7
	mm	300.0	276.9	256.2	237.4	220.1	204.2	189.5	175.7	162.8	150.6	139.1	128.3	118.0	108.1	98.7	89.8	81.2	72.9	65.0	57.4	50.0

付録2.4(3) 保温層の温度分布 (Case-A12: He雰囲気)  保温層内温度

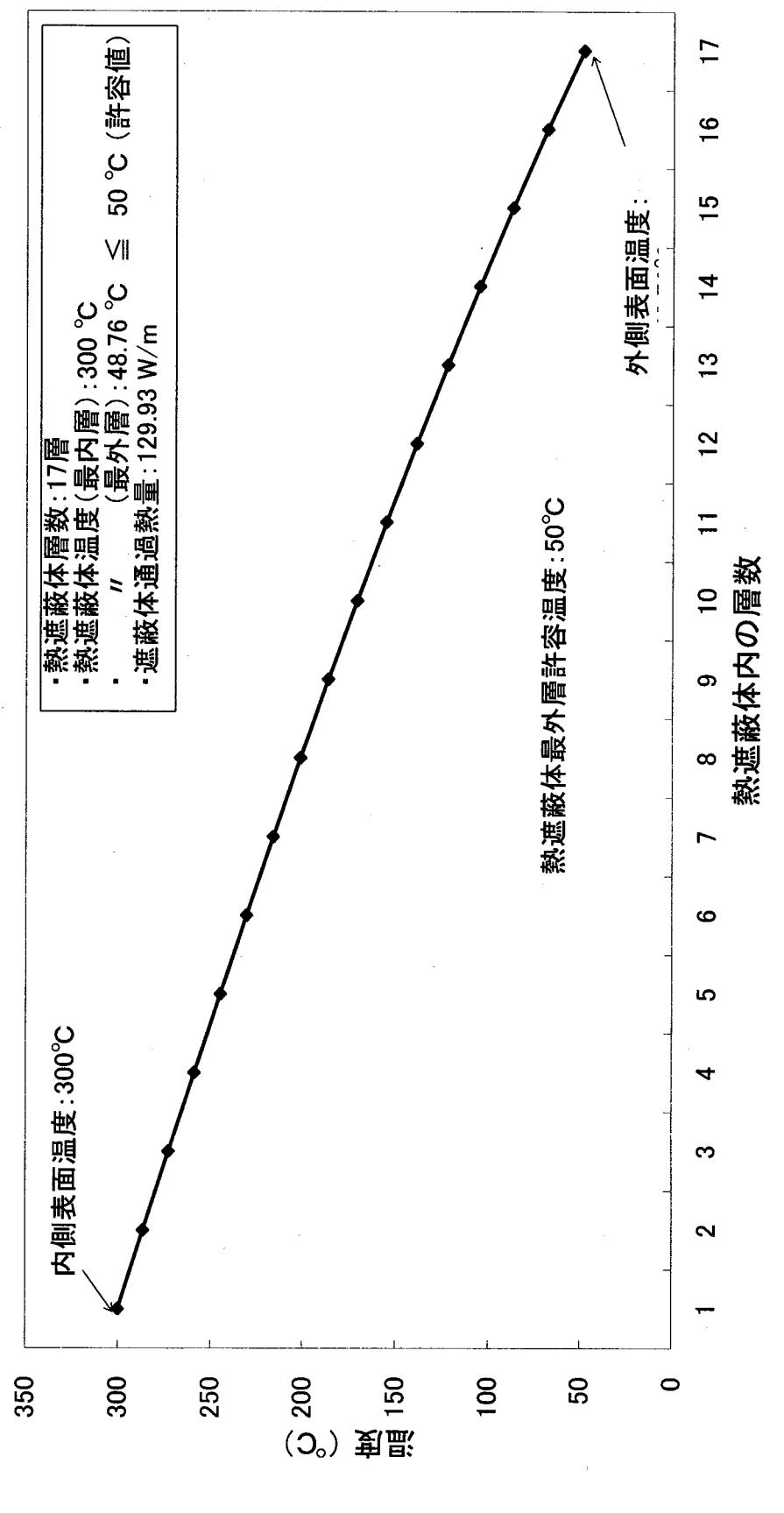
付録2.4(4) 热遮蔽体各層の温度分布 (Case-A20: 真空)

热遮蔽体層 各層温度	層目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
热遮蔽体層 各層温度	℃	300.0	289.2	278.1	266.7	254.9	242.6	230.8	216.4	202.1	187.0	170.6	152.6	132.6	109.7	82.6	48.1



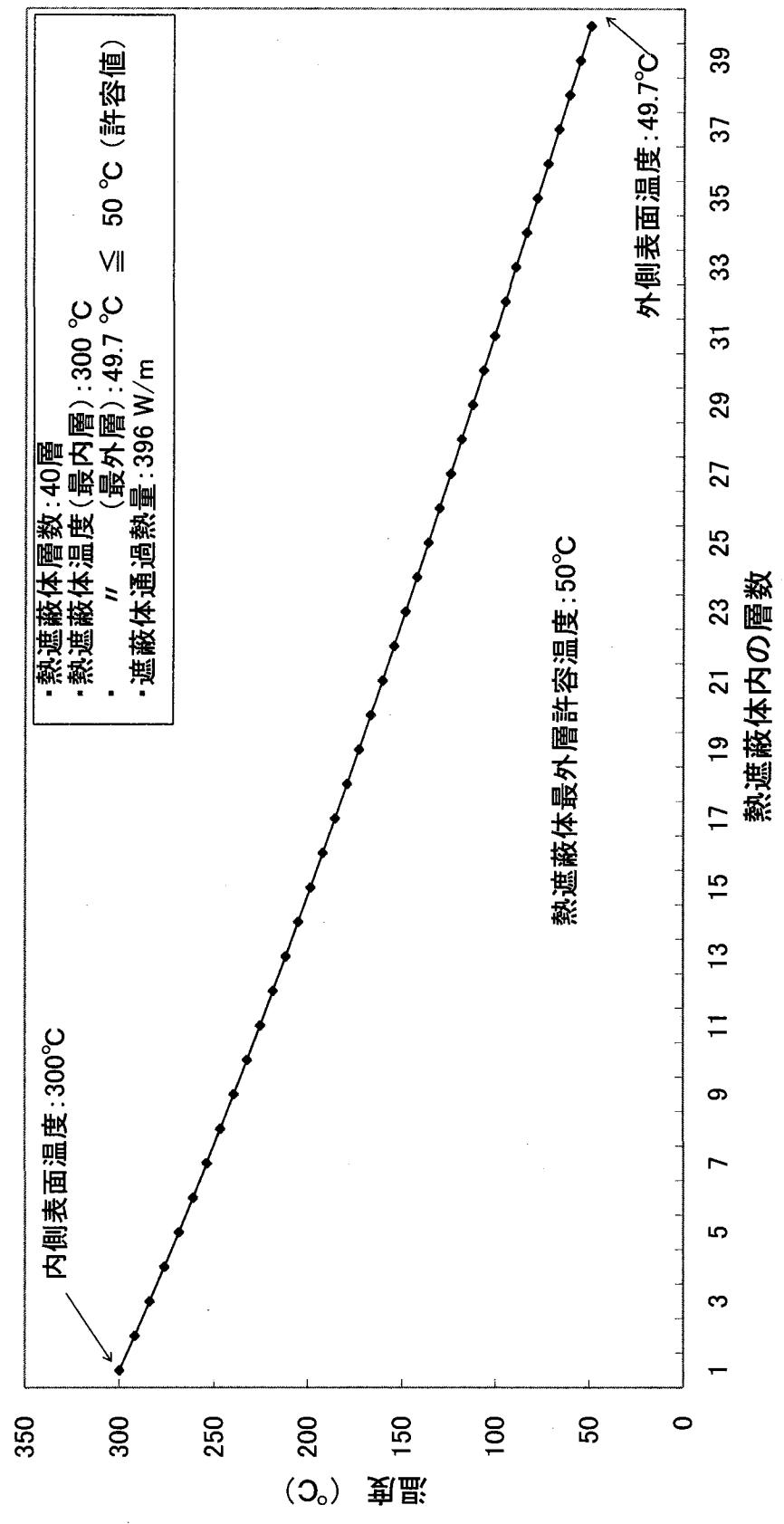
熱遮蔽体層 各層温度	層目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	℃	300.0	286.4	272.7	258.8	244.8	230.6	216.2	201.5	186.5	171.1	155.3	139.2	122.5	105.2	87.2	68.4	48.76

付録2.4(5) 热遮蔽体各層の温度分布 (Case-A21: Ar零圧気)



熱遮蔽体層 各層温度 ℃	層目 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
300	292	284	276	269	261	254	246	239	232	225	219	212	205	199	192	186	179	173	167	160	154	148	142	136	130	124	118	113	107	101	95	89	84	78	72	67	61	55	50	

付録2.4(6) 热遮蔽体各層の温度分布 (Case-A22:He雰囲気)



## 付録2.5 热遮蔽板輻射率および層間移動熱量

热遮蔽板 枚数	Case-A20		Case-A21		Case-A22	
	輻射率	Qa=Qb (W/m)	輻射率	Qa=Qb (W/m)	輻射率	Qa=Qb (W/m)
1	解なし					
2	0.00715	34.6				
3	0.02146	35.6				
4	0.03594	36.7				
5	0.05055	37.8				
6	0.06527	38.8				
7	0.08007	39.9				
8	0.09494	40.9				
9	0.10985	42.0				
10	0.12478	43.0				
11	0.13972	44.0	解なし			
12	0.15466	45.1	0.02340	124.2		
13	0.16957	46.1	0.06674	126.8		
14	0.18444	47.1	0.10922	129.2		
15	0.19927	48.1	0.15062	131.7		
16	0.21404	49.1	0.19081	134.2		
17	0.22875	50.1	0.22976	136.7		
18	0.24337	51.1	0.26749	139.1		
19	0.25791	52.1	0.30400	141.5		
20	0.27236	53.1	0.33933	144.0		
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
31						
32						
33						
34						
35						
36						
37					解なし	
38					0.03463	390.5
39					0.13779	395.1
40					0.23143	399.6
41					0.31660	404.1

## 付録2.6 热遮蔽体層間移動熱量内訳

	Case-A21				Case-A22			
	輻射率: 0.02340		輻射率: 0.22976		輻射率: 0.03463		輻射率: 0.23143	
	Qac (W)	Qar (W)						
1層目-2層目	114.8	9.4	71.4	65.3	384.7	5.8	359.2	40.4
2層目-3層目	115.5	8.7	73.2	63.5	384.9	5.6	360.4	39.2
3層目-4層目	116.2	8.0	75.1	61.6	385.1	5.4	361.5	38.1
4層目-5層目	116.9	7.3	77.0	59.6	385.2	5.3	362.6	37.0
5層目-6層目	117.6	6.6	79.0	57.6	385.4	5.1	363.6	36.0
6層目-7層目	118.2	6.0	81.1	55.5	385.6	4.9	364.6	35.0
7層目-8層目	118.8	5.4	83.2	53.4	385.7	4.8	365.6	34.0
8層目-9層目	119.4	4.8	85.4	51.2	385.9	4.6	366.6	33.0
9層目-10層目	120.0	4.2	87.7	48.9	386.1	4.5	367.5	32.1
10層目-11層目	120.5	3.7	90.1	46.6	386.2	4.3	368.4	31.2
11層目-12層目	118.7	5.6	92.6	44.1	386.3	4.2	369.3	30.3
12層目-13層目			95.2	41.5	386.5	4.0	370.2	29.4
13層目-14層目			97.8	38.8	386.6	3.9	371.0	28.6
14層目-15層目					386.7	3.8	371.9	27.7
15層目-16層目					386.9	3.7	372.7	26.9
16層目-17層目					387.0	3.5	373.4	26.2
17層目-18層目					387.1	3.4	374.2	25.4
18層目-19層目					387.2	3.3	374.9	24.7
19層目-20層目					387.3	3.2	375.7	23.9
20層目-21層目					387.4	3.1	376.4	23.2
21層目-22層目					387.5	3.0	377.1	22.5
22層目-23層目					387.6	2.9	377.8	21.8
23層目-24層目					387.7	2.8	378.4	21.2
24層目-25層目					387.8	2.7	379.1	20.5
25層目-26層目					387.9	2.6	379.7	19.9
26層目-27層目					388.0	2.5	380.3	19.3
27層目-28層目					388.1	2.4	380.9	18.7
28層目-29層目					388.2	2.3	381.5	18.1
29層目-30層目					388.3	2.3	382.1	17.5
30層目-31層目					388.3	2.2	382.7	16.9
31層目-32層目					388.4	2.1	383.3	16.3
32層目-33層目					388.5	2.0	383.8	15.8
33層目-34層目					388.6	1.9	384.3	15.3
34層目-35層目					388.6	1.9	384.9	14.7
35層目-36層目					388.7	1.8	385.4	14.2
36層目-37層目					388.8	1.7	385.9	13.7
37層目-38層目					387.7	2.8	386.4	13.2
38層目-39層目							386.9	12.7
39層目-40層目							388.3	11.3

付録3.1(1) 計算モデル上の各要素寸法および配置(要素①-⑩、⑪の場合)

要素No	熱の流れ方向		要素寸法			放熱面積 (W*L) Al m2	ヒーター 施工面積 Ah m2	要素間伝熱面積 (t*W) Act m2	VTA端面 との距離 δ mm
	上流側	下流側	厚さ t mm	幅 W mm	長さ L mm				
1	保温層境界	→要素1中心	10	530	77.5	0.0411	0.0822	0.0053	—
	要素1中心	→外表面	5	530	155	0.0822		—	115
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	530	155	0.0822		—	
	要素1中心	→要素1-2境界	10	530	77.5	0.0411		0.0053	
2	要素1-2境界	→要素2中心	10	517.5	45	0.0233	0.0455	0.0052	—
	要素2中心	→外表面	5	505	90	0.0455		—	70
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	505	90	0.0455		—	
	要素2中心	→要2-3境界	10	492.5	45	0.0222		0.0049	
3	要素2-3境界	→要素3中心	10	445	45	0.0200	0.0369	0.0045	—
	要素3中心	→外表面	5	410	90	0.0369		—	85
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	410	90	0.0369		—	
	要素3中心	→要素3-4境界	10	375	45	0.0169		0.0038	
4	要素3-4境界	→要素4中心	10	340	40	0.0136	0.0272	0.0034	—
	要素中心	→外表面	5	340	80	0.0272		—	90
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	340	80	0.0272		—	
	要素中心	→要素4-5境界	10	340	40	0.0136		0.0034	
5	要素4-5境界	→要素5中心	45	318.0	37.5	—	0.0122	0.0143	—
	要素5中心	→要素5-6境界	35	370.0	37.5	—		0.0129	—
	要素5中心	→要素5-7境界	20	340.8	75	—		0.0256	—
	要素No 5-7境界の接触部			340.8	75	—		0.0256	—
6	要素5-6境界	→要素6中心	28.3	433.5	26.2	—	0.0122	0.0122	—
	要素6中心	→要素6-8境界	13.3	461.2	52.4	—		0.0242	—
	要素6中心	→要素6-9境界	24.8	492.9	26.2	—		—	—
	要素6-8境界の接触部			461.2	52.4	—		0.0242	—
7	要素6-9境界の接触部			23.0	529.3	—	0.0122	0.0122	—
	要素5-7境界	→要素7中心	10	261.5	75	0.0196		—	0.0196
	要素7中心	→外表面	10	—	—	0.0431		—	16.5
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	—	—	0.0431	0.0209	—	
8	要素7中心	→要素7-8境界	20	350.0	37.5	0.0131	0.0241	0.0070	—
	要素6-8境界	→要素8中心	17.5	438.7	52.4	—		0.0230	—
	要素7-8境界	→要素8中心	35	428.2	26.2	0.0112		0.0150	—
	要素8中心	→外表面	17.5	—	—	0.0300		—	1.5
9	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	—	—	0.0300	0.0326	—	—
	要素8中心	→要素8-9境界	35	449.2	26.2	0.0118		0.0157	—
	要素6-9境界	→要素9中心	20.7	533.3	30	—		0.0111	—
	要素8-9境界	→要素9中心	31.5	463.2	30	0.0139		0.0146	—
10	要素9中心	→外表面	23.25	—	—	0.0384	0.0326	—	1.5
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	—	—	0.0384		—	
	要素9中心	→要素9-10境界	40.75	501.6	30	0.0150		0.0204	—
	要素9-10境界	→要素10中心	35	468.4	30	0.0141		0.0164	—
11	要素10中心	→外表面	17.5	—	—	0.0412	0.0135	—	1.5
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	—	—	0.0412		—	
	要素10中心	→要素10-11境界	35	386.4	30	0.0116		—	—
	要素10-11境界	→要素11中心	35	332.2	33.8	0.0112		0.0116	—
11	要素11中心	→外表面	17.5	—	—	0.0480	0.0107	—	1.5
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	—	—	0.0480		—	
	要素11中心	→背面壁中心	35	305.9	33.8	0.0103		0.0107	—
	要素11中心	→要素11中心	35	—	—	—		—	

注) ケースにより要素7-9はヒーターを施工しない。

## 付録3.1(2) 計算モデル上の各要素寸法および配置(要素①-⑩、⑪x、⑫xの場合)

要素No	熱の流れ方向		要素寸法			放熱面積 (W*L) Al m <sup>2</sup>	ヒーター 施工面積 Ah m <sup>2</sup>	要素間伝熱面積 (t*W) Act m <sup>2</sup>	VTA端面 との距離 δ mm
	上流側	下流側	厚さ t mm	幅 W mm	長さ L mm				
1	保温層境界	→要素1中心	10	530	77.5	0.0411	0.0822	0.0053	—
	要素1中心	→外表面	5	530	155	0.0822		—	—
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	530	155	0.0822		—	115
	要素1中心	→要素1-2境界	10	530	77.5	0.0411		0.0053	—
2	要素1-2境界	→要素2中心	10	517.5	45	0.0233	0.0455	0.0052	—
	要素2中心	→外表面	5	505	90	0.0455		—	—
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	505	90	0.0455		—	70
	要素2中心	→要2-3境界	10	492.5	45	0.0222		0.0049	—
3	要素2-3境界	→要素3中心	10	445	45	0.0200	0.0369	0.0045	—
	要素3中心	→外表面	5	410	90	0.0369		—	—
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	410	90	0.0369		—	85
	要素3中心	→要素3-4境界	10	375	45	0.0169		0.0038	—
4	要素3-4境界	→要素4中心	10	340	40	0.0136	0.0272	0.0034	—
	要素4中心	→外表面	5	340	80	0.0272		—	—
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	340	80	0.0272		—	90
	要素4中心	→要素4-5境界	10	340	40	0.0136		0.0034	—
5	要素4-5境界	→要素5中心	45	318.0	37.5	—	0.0272	0.0143	—
	要素5中心	→要素5-6境界	35	370.0	37.5	—		0.0129	—
	要素5中心	→要素5-7境界	20	340.8	75	—		0.0256	—
要素No 5-7境界の接触部				340.8	75				0.0256
6	要素5-6境界	→要素6中心	28.3	433.5	26.2	—	0.0272	0.0122	—
	要素6中心	→要素6-8境界	13.3	461.2	52.4	—		0.0242	—
	要素6中心	→要素6-9境界	24.8	492.9	26.2	—		0.0122	—
要素6-8境界の接触部				461.2	52.4				0.0242
要素6-9境界の接触部				23.0	529.3			0.0122	
7	要素5-7境界	→要素7中心	10	261.5	75	0.0196	0.0209	—	0.0196
	要素7中心	→外表面	10	—	—	0.0431		—	—
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	—	—	0.0431		—	16.5
	要素7中心	→要素7-8境界	20	350.0	37.5	0.0131		0.0070	—
8	要素6-8境界	→要素8中心	17.5	438.7	52.4	—	0.0241	0.0150	0.0230
	要素7-8境界	→要素8中心	35	428.2	26.2	0.0112		—	—
	要素8中心	→外表面	17.5	—	—	0.0300		—	1.5
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	—	—	0.0300		—	—
	要素8中心	→要素8-9境界	35	449.2	26.2	0.0118		0.0157	—
9	要素6-9境界	→要素9中心	20.7	533.3	30	—	0.0326	0.0111	—
	要素8-9境界	→要素9中心	31.5	463.2	30	0.0139		0.0146	—
	要素9中心	→外表面	23.25	—	—	0.0384		—	—
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	—	—	0.0384		—	1.5
	要素9中心	→要素9-10境界	40.75	501.6	30	0.0150		0.0204	—
10	要素9-10境界	→要素10中心	35	468.4	30	0.0141	0.0359	0.0164	—
	要素10中心	→外表面	17.5	—	—	0.0412		—	—
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	—	—	0.0412		—	1.5
	要素10中心	→要素10-11境界	35	386.4	30	0.0116		0.0135	—
11	要素10-11境界	→要素11中心	35	338.8	16.9	0.0057	0.0210	0.0119	—
	要素11中心	→外表面	17.5	—	—	0.0239		—	—
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	—	—	0.0239		—	1.5
	要素11中心	→要素11-12境界	35	325.6	16.9	0.0055		0.0114	—
12	要素11-12境界	→要素12中心	35	312.4	16.9	0.0053	0.0109	—	—
	要素12中心	→外表面	17.5	—	—	0.0241		—	—
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	—	—	0.0241		—	1.5
	要素12中心	→背面壁中心	35	299.3	16.9	0.0051		0.0105	—

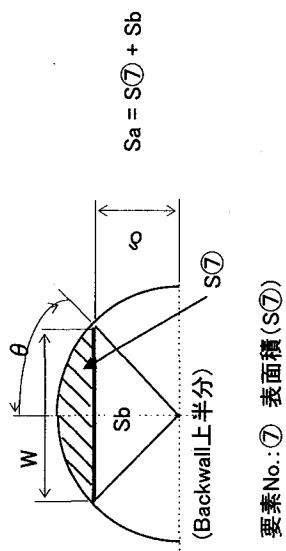
## 付録3.1(3) 計算モデル上の各要素寸法および配置(要素①-⑩、⑪Y、⑫Yの場合)

要素No	熱の流れ方向		要素寸法			放熱面積 (W*L) Al m <sup>2</sup>	ヒーター施工面積 Ah m <sup>2</sup>	要素間伝熱面積 (t*W) Act m <sup>2</sup>	VTA端面 との距離 δ mm
	上流側	下流側	厚さ t mm	幅 W mm	長さ L mm				
1	保温層境界	→要素1中心	10	530	77.5	0.0411		0.0053	—
	要素1中心	→外表面	5	530	155	0.0822		—	—
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	530	155	0.0822	0.0822	—	115
	要素1中心	→要素1-2境界	10	530	77.5	0.0411		0.0053	—
2	要素1-2境界	→要素2中心	10	517.5	45	0.0233		0.0052	—
	要素2中心	→外表面	5	505	90	0.0455		—	—
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	505	90	0.0455	0.0455	—	70
	要素2中心	→要2-3境界	10	492.5	45	0.0222		0.0049	—
3	要素2-3境界	→要素3中心	10	445	45	0.0200		0.0045	—
	要素3中心	→外表面	5	410	90	0.0369		—	—
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	410	90	0.0369	0.0369	—	85
	要素3中心	→要素3-4境界	10	375	45	0.0169		0.0038	—
4	要素3-4境界	→要素4中心	10	340	40	0.0136		0.0034	—
	要素中心	→外表面	5	340	80	0.0272		—	—
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	340	80	0.0272	0.0272	—	90
	要素中心	→要素4-5境界	10	340	40	0.0136		0.0034	—
5	要素4-5境界	→要素5中心	45	318.0	37.5	—		0.0143	—
	要素5中心	→要素5-6境界	35	370.0	37.5	—		0.0129	—
	要素5中心	→要素5-7境界	20	340.8	75			0.0256	
	要素No 5-7境界の接触部			340.8	75			0.0256	
6	要素5-6境界	→要素6中心	28.3	433.5	26.2	—		0.0122	—
	要素6中心	→要素6-8境界	13.3	461.2	52.4			0.0242	
	要素6中心	→要素6-9境界	24.8	492.9	26.2		0.0122	—	
要素6-8境界の接触部				461.2	52.4			0.0242	
要素6-9境界の接触部				23.0	529.3			0.0122	
7	要素5-7境界	→要素7中心	10	261.5	75	0.0196		—	0.0196
	要素7中心	→外表面	10	—	—	0.0431		—	—
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	—	—	0.0431	0.0209	—	16.5
	要素7中心	→要素7-8境界	20	350.0	37.5	0.0131		0.0070	—
8	要素6-8境界	→要素8中心	17.5	438.7	52.4			0.0230	
	要素7-8境界	→要素8中心	35	428.2	26.2	0.0112		0.0150	—
	要素8中心	→外表面	17.5	—	—	0.0300	0.0241	—	1.5
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	—	—	0.0300		0.0157	—
9	要素8-9境界	→要素8-9境界	35	449.2	26.2	0.0118		0.0157	—
	要素9中心	→要素9中心	20.7	533.3	30			0.0111	
	要素9中心	→外表面	31.5	463.2	30	0.0139		0.0146	—
	外表面	→VTA(+霧囲気)	23.25	—	—	0.0384	0.0326	—	1.5
10	要素9-10境界	→要素9-10境界	40.75	501.6	30	0.0150		0.0204	—
	要素10中心	→要素10中心	35	468.4	30	0.0141		0.0164	—
	外表面	→VTA(+霧囲気)	17.5	—	—	0.0412	0.0359	—	1.5
	要素10中心	→要素10-11境界	35	386.4	30	0.0116		0.0135	—
11	要素10-11境界	→要素11中心	35	338.8	16.9	0.0057		0.0119	—
	要素11中心	→外表面	17.5	—	—	0.0379		—	—
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	—	—	0.0379	0.0321	—	1.5
	要素11中心	→要素11-12境界	35	325.6	16.9	0.0055		0.0114	—
12	要素11-12境界	→要素12中心	35	312.4	16.9	0.0053		0.0109	—
	要素12中心	→外表面	17.5	—	—	0.0101		—	—
	外表面	→VTA(+霧囲気)	—	—	—	0.0101		—	1.5
	要素12中心	→背面壁中心	35	299.3	16.9	0.0051		0.0105	—

## 付録3.2(1) 背面壁放熱面面積(要素①~⑩、⑪の場合)

## 計算条件

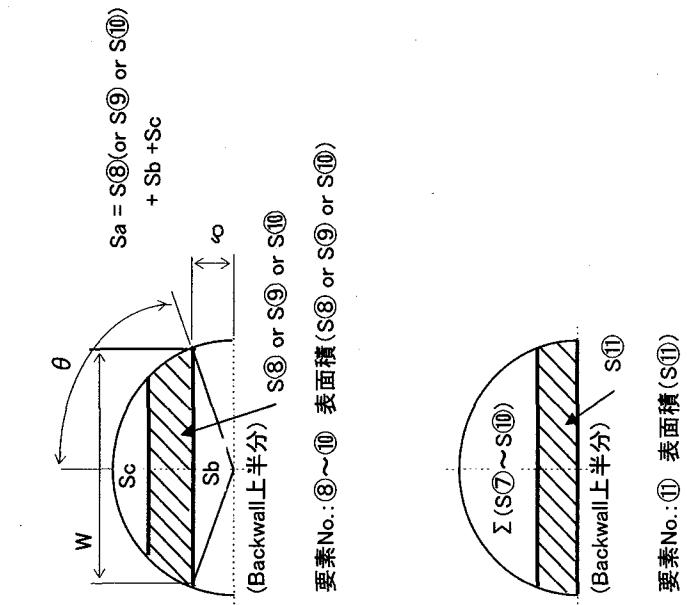
項目	記号	単位	値
バックウォール半径	R	m	0.3575
⑦要素高さ	L7	m	0.1175
⑧要素高さ	L8	m	0.0524
⑨要素高さ	L9	m	0.06
⑩要素高さ	L10	m	0.06
⑪要素高さ	L11	m	0.0676



## 計算

項目	記号	単位	要素表面積			
			要素 ⑦	要素 ⑧	要素 ⑨	要素 ⑩
$\delta = R - L_n$	$\delta$	m	0.24	0.1876	0.1276	0.0676
$\theta = \cos(\delta / R)$	$\theta$	度	47.8	58.3	69.1	79.1
$W = 2R * \sin \theta$	W	m	0.5299	0.6086	0.6679	0.7021
$Sa = \pi * R^2 * \theta / 180$ (扇形部面積)	Sa	$m^2$	0.107	0.130	0.154	0.176
$Sb = \delta * R * \sin \theta$	Sb	$m^2$	0.064	0.057	0.043	0.024
円弧部面積	Sc	$m^2$	-	0.043	0.073	0.111

要素面積 (要素No.: ⑦~⑪)	項目	記号	単位	要素表面積			
				要素 ⑦	要素 ⑧	要素 ⑨	要素 ⑩
(1) 要素⑦~⑪		$S7 \sim S10$	$m^2$	0.0431	0.0300	0.0384	0.0412
・ $S7 = Sa - Sb$							
・ $S8 \sim 10 = Sa - Sb - Sc$							
(2) 要素⑪		$S11$	$m^2$				
・ $S11 = \pi * R^2 / 2 - \sum (S7 \sim S10)$							
要素総面積 ( $S7 \sim S11$ の合計)		Stotal	$m^2$				0.2008

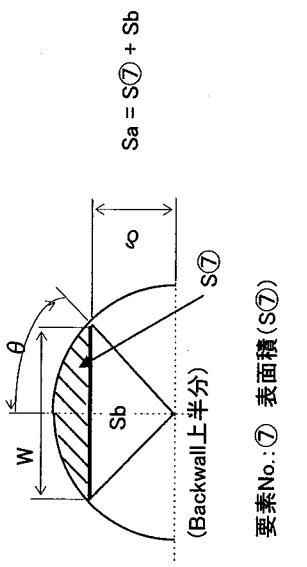


(注) サフィックス①~⑪ : 要素No.を示す。

## 付録3.2(2) 背面壁放熱面積(要素①~⑩、⑪x、⑫xの場合)

## 計算条件

項目	記号	単位	値
バックウォール半径	R	m	0.3575
⑦要素高さ	L7	m	0.1175
⑧要素高さ	L8	m	0.0524
⑨要素高さ	L9	m	0.06
⑩要素高さ	L10	m	0.06
⑪x要素高さ	L11	m	0.0338
⑫x要素高さ	L12	m	0.0338

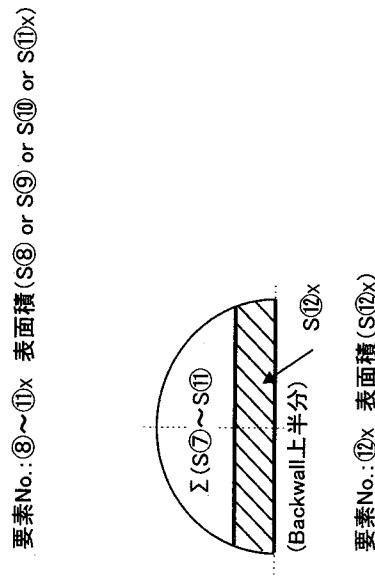


## 計算

項目	記号	単位	要素表面積			
			要素⑦	要素⑧	要素⑨	要素⑩
$\delta = R - L_n$	$\delta$	m	0.24	0.1876	0.1276	0.0676
$\theta = \cos(\delta/R)$	$\theta$	度	47.8	58.3	69.1	84.6
$W = 2R \cdot \sin \theta$	W	m	0.5299	0.6086	0.6679	0.7021
$S_a = \pi * R^2 * \theta / 180$ (扇形部面積)	Sa	$m^2$	0.107	0.130	0.154	0.176
$S_b = \delta * R * \sin \theta$	Sb	$m^2$	0.064	0.057	0.043	0.024
円弧部面積	Sc	$m^2$	-	0.043	0.073	0.111
						0.153

## 要素面積 (要素No.: ⑦~⑪x、⑫x)

項目	記号	単位	要素表面積			
			要素⑦	要素⑧	要素⑨	要素⑩
(1) 要素⑦~⑪x	$S7 \sim S11x$	$m^2$	0.0431	0.0300	0.0384	0.0412
・ $S7 = S_a - S_b$						0.0239
・ $S8 \sim 11x = S_a - S_b - S_c$						
(2) 要素⑫x	$S12x$	$m^2$				
・ $S12 = \pi R^2 / 2 - \sum (S7 \sim S11x)$						0.0241
要素総面積( $S7 \sim S12$ の合計)	Stotal	$m^2$				0.2008

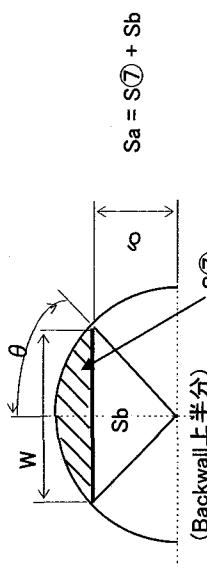


(注) サフィックス①~⑪x : 要素No.を示す。

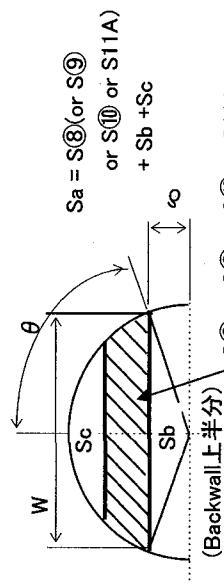
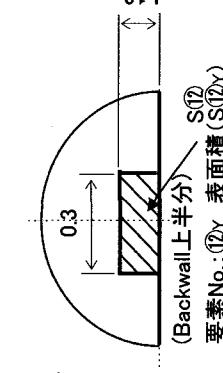
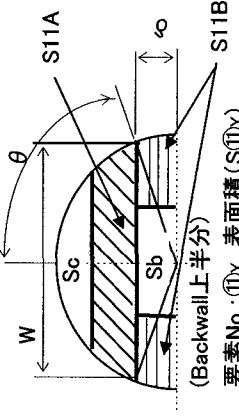
付録3.2(3) 背面壁放熱面面積(要素①~⑩、⑪ $\gamma$ 、⑫ $\gamma$ の場合)

## 計算条件

項目	記号	単位	値
バックウォール半径	R	m	0.3575
⑦要素高さ	L7	m	0.1175
⑧要素高さ	L8	m	0.0524
⑨要素高さ	L9	m	0.06
⑩要素高さ	L10	m	0.06
⑪ $\gamma$ 要素高さ	L11	m	0.0338
⑫ $\gamma$ 要素高さ	L12	m	0.0338



要素No.:⑦ 表面積(S7)

要素No.:⑧~⑪ $\gamma$  表面積(S8 or S9 or S10 or S11A)要素No.:⑫ $\gamma$  表面積(S12)

項目	記号	単位	要素表面積			
			要素⑦	要素⑧	要素⑨	要素⑩
$\delta=R-Ln$	$\delta$	m	0.24	0.1876	0.1276	0.0676
$\theta=\text{acos}(\delta/R)$	$\theta$	度	47.8	58.3	69.1	84.6
$W=2R \cdot \sin \theta$	W	m	0.5299	0.6086	0.6679	0.7021
$Sa=\pi * R^2 * \theta / 180$ (扇形部面積)	Sa	$m^2$	0.107	0.130	0.154	0.176
$Sb=\delta * R * \sin \theta$	Sb	$m^2$	0.064	0.057	0.043	0.024
円弧部面積	Sc	$m^2$	-	0.043	0.073	0.111
						0.153

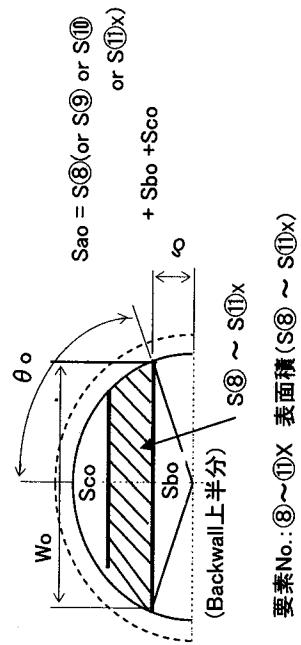
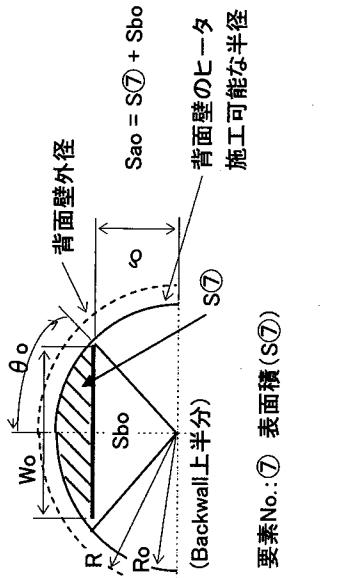
要素面積(要素No.:⑦~⑪ $\gamma$ )

項目	記号	単位	要素表面積			
			要素⑦	要素⑧	要素⑨	要素⑩
(1) 要素⑦~⑪ $\gamma$	$S7 \sim S11\gamma$	$m^2$	0.0431	0.0300	0.0384	0.0412
内訳			0.0431	0.0300	0.0384	0.0412
• $S7=Sa-Sb$						0.0379
• $S8 \sim S10=Sa-Sb-Sc$						
• $S11\gamma=S11A+S11B$						
• $S11A=Sa-Sc$						
• $S11B=2Sd$						
(2) 要素⑫ $\gamma$	$S12\gamma$	$m^2$				
• $S12=\pi * R^2 / 2 - \sum (S7 \sim S11\gamma)$						
要素総面積( $S7 \sim S12\gamma$ の合計)	Stotal	$m^2$				0.2046

(注) サフィックス①~⑫ $\gamma$  :要素No.を示す。

付録3.3(1) 背面壁ヒーター施工可能部の面積(要素①~⑩、⑪X、⑫Xの場合)

計算条件			
項目	記号	単位	値
背面壁半径	R	m	0.3575
⑦要素高さ	L7	m	0.1175
⑧要素高さ	L8	m	0.0524
⑨要素高さ	L9	m	0.06
⑩要素高さ	L10	m	0.06
⑪要素高さ	L11	m	0.0388
⑫要素高さ	L12	m	0.0388
背面壁のヒータ施工可能な半径	Ro	m	0.315



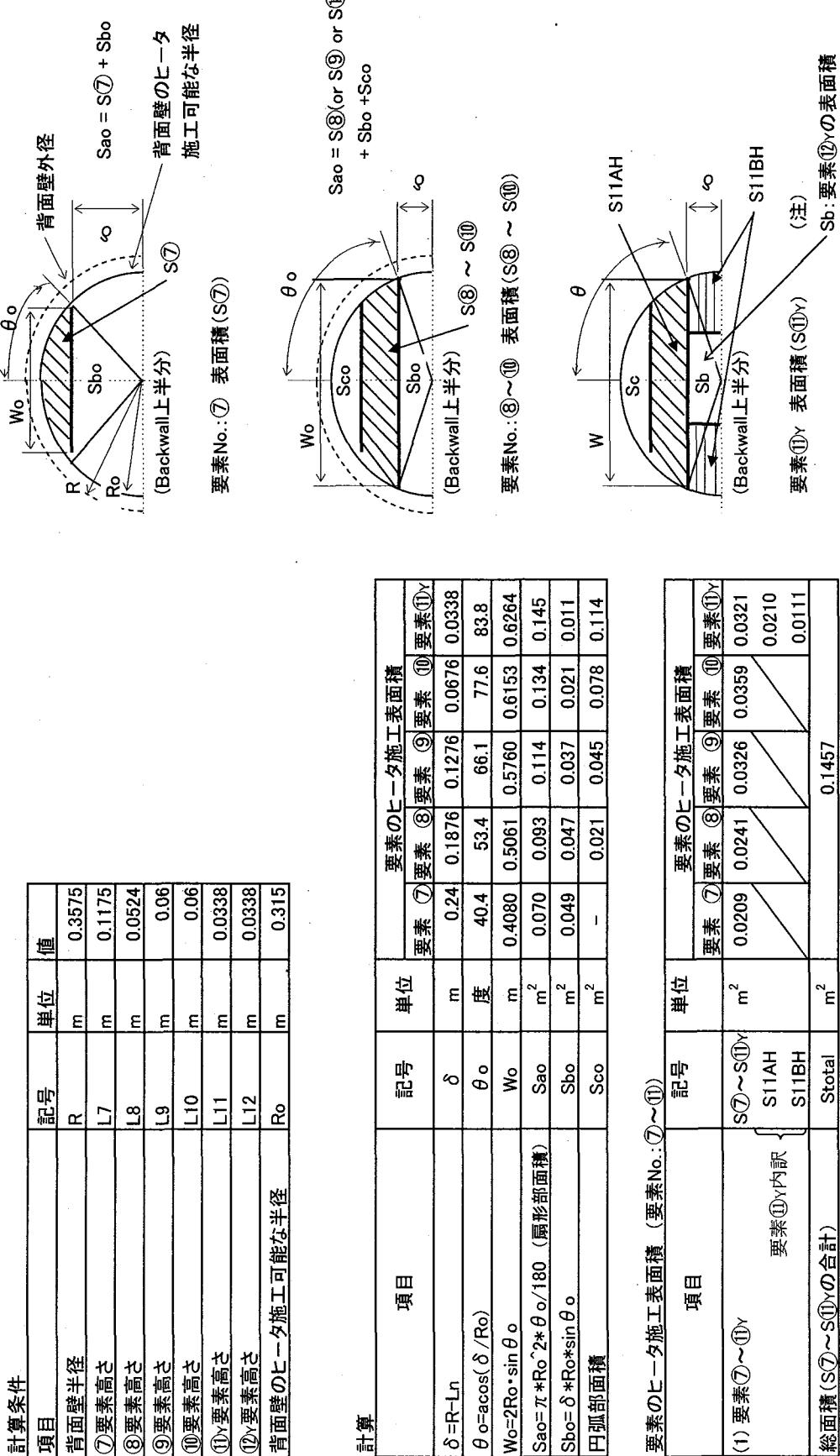
項目	記号	単位	要素 ⑦ 要素 ⑧ 要素 ⑨ 要素 ⑩ 要素 ⑪X					
$\delta=R-L_n$	$\delta$	m	0.24	0.1876	0.1276	0.0676	0.0338	
$\theta_0=\arccos(\delta/R_o)$	$\theta_0$	度		40.4	53.4	66.1	77.6	83.8
$W_0=2R_o \cdot \sin \theta_0$	$W_0$	m		0.4080	0.5061	0.5760	0.6153	0.6264
$Sao=\pi * R_o^2 * \theta_0 / 180$ (扇形部面積)	$Sao$	$m^2$		0.070	0.093	0.114	0.134	0.145
$Sbo=\delta * Ro * \sin \theta_0$	$Sbo$	$m^2$		0.049	0.047	0.037	0.021	0.011
円弧部面積	$Sco$	$m^2$	-	0.021	0.045	0.078	0.114	

要素のヒータ施工表面積 (要素No.: ⑦~⑪)

項目	記号	単位	要素 ⑦ 要素 ⑧ 要素 ⑨ 要素 ⑩ 要素 ⑪X 要素のヒータ施工表面積				
(1) 要素⑦~⑪X	$S(7) \sim S(11)X$	$m^2$	0.0209	0.0241	0.0326	0.0359	0.0210
・ $S(7)=Sao-Sbo$							
・ $S(8) \sim (11)X=Sao-Sbo-Sco$							
総面積( $S(7) \sim S(11)X$ の合計)	$S_{total}$	$m^2$					0.1346

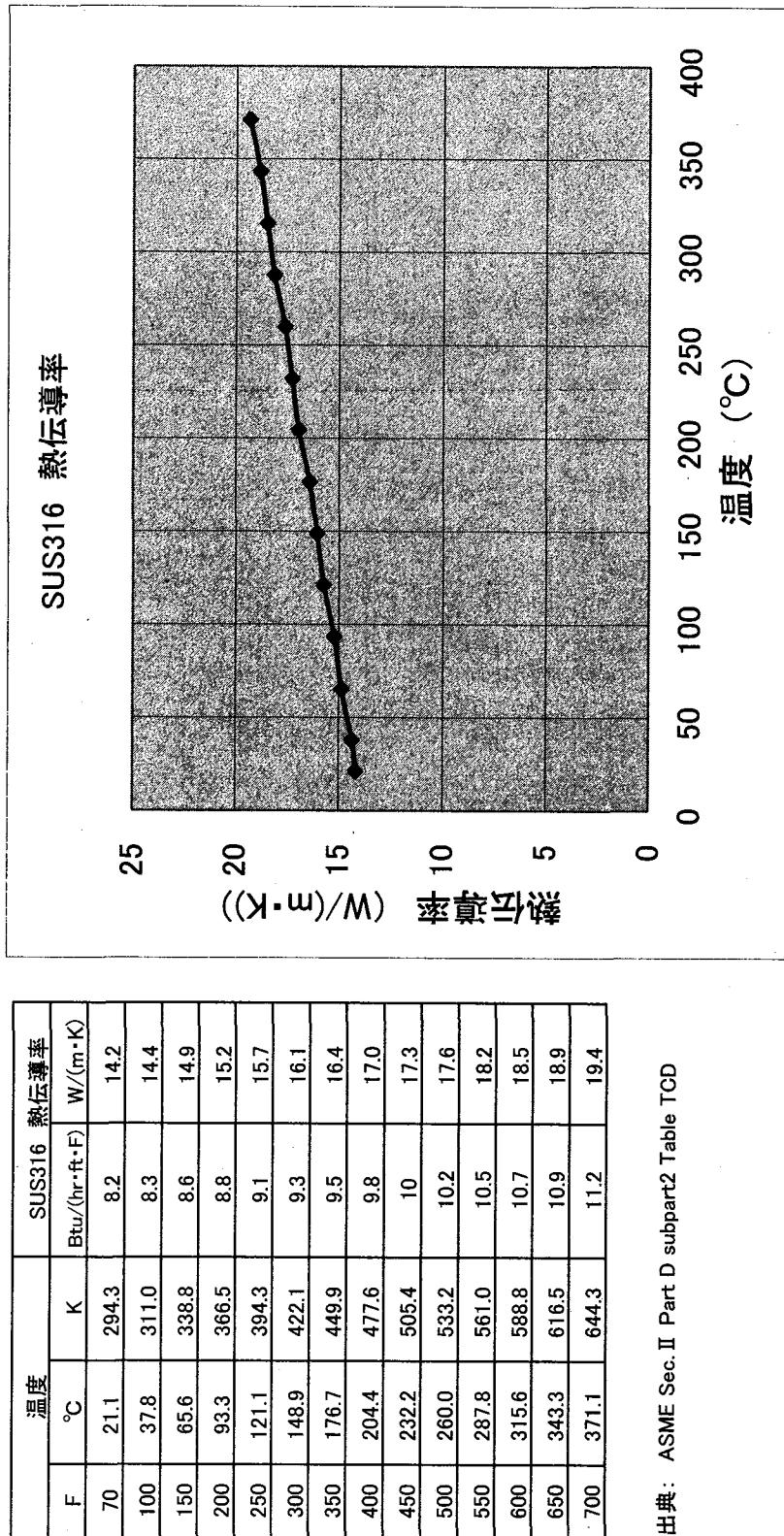
(注) サフィックス①~⑪X : 要素No.を示す。

## 付録3.3(2) 背面壁ヒータ施工可能な部の面積(要素①~⑩、⑪γ、⑫γの場合)

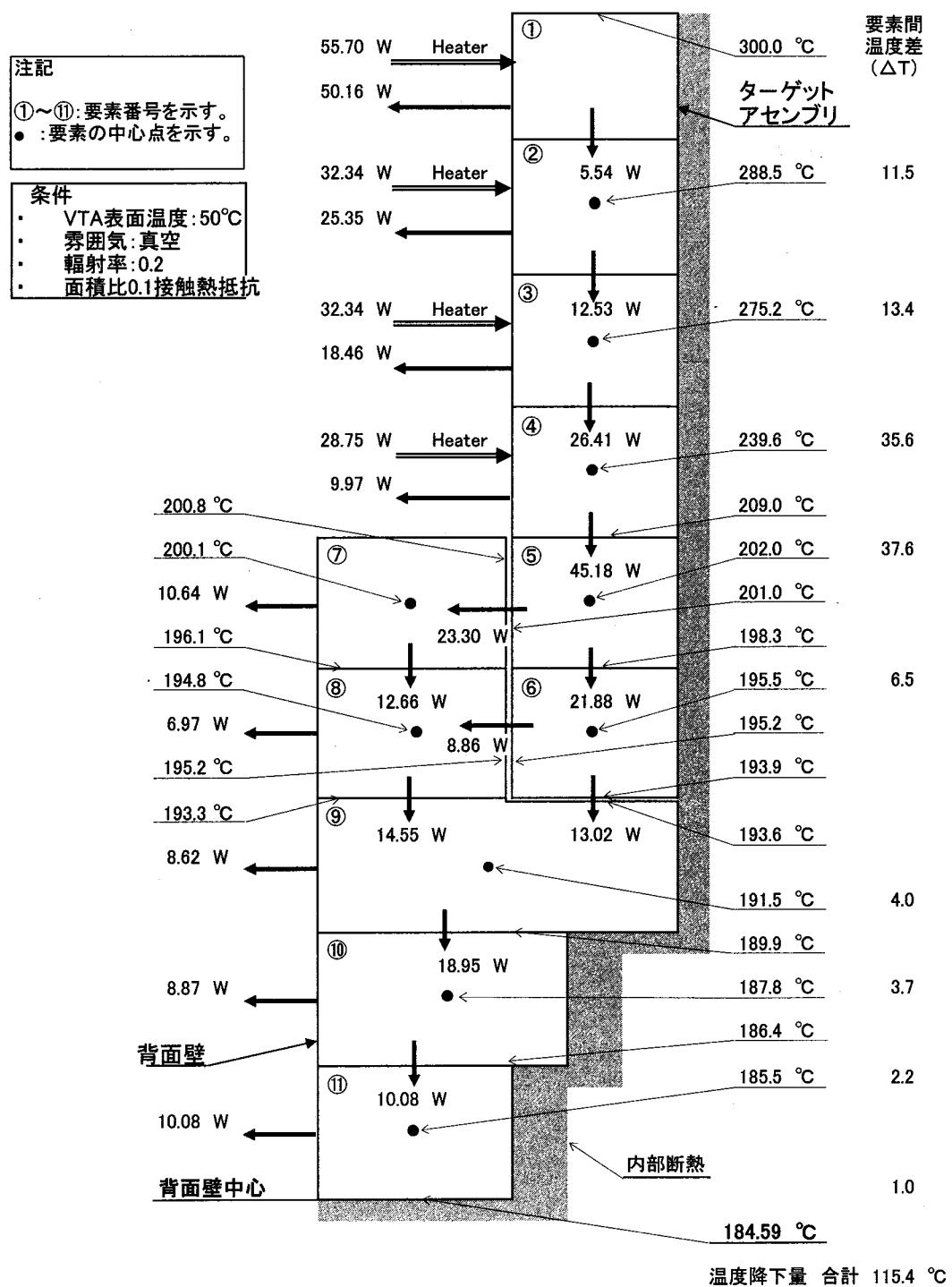


(注) サフィックス①～⑪γ : 要素No.を示す。

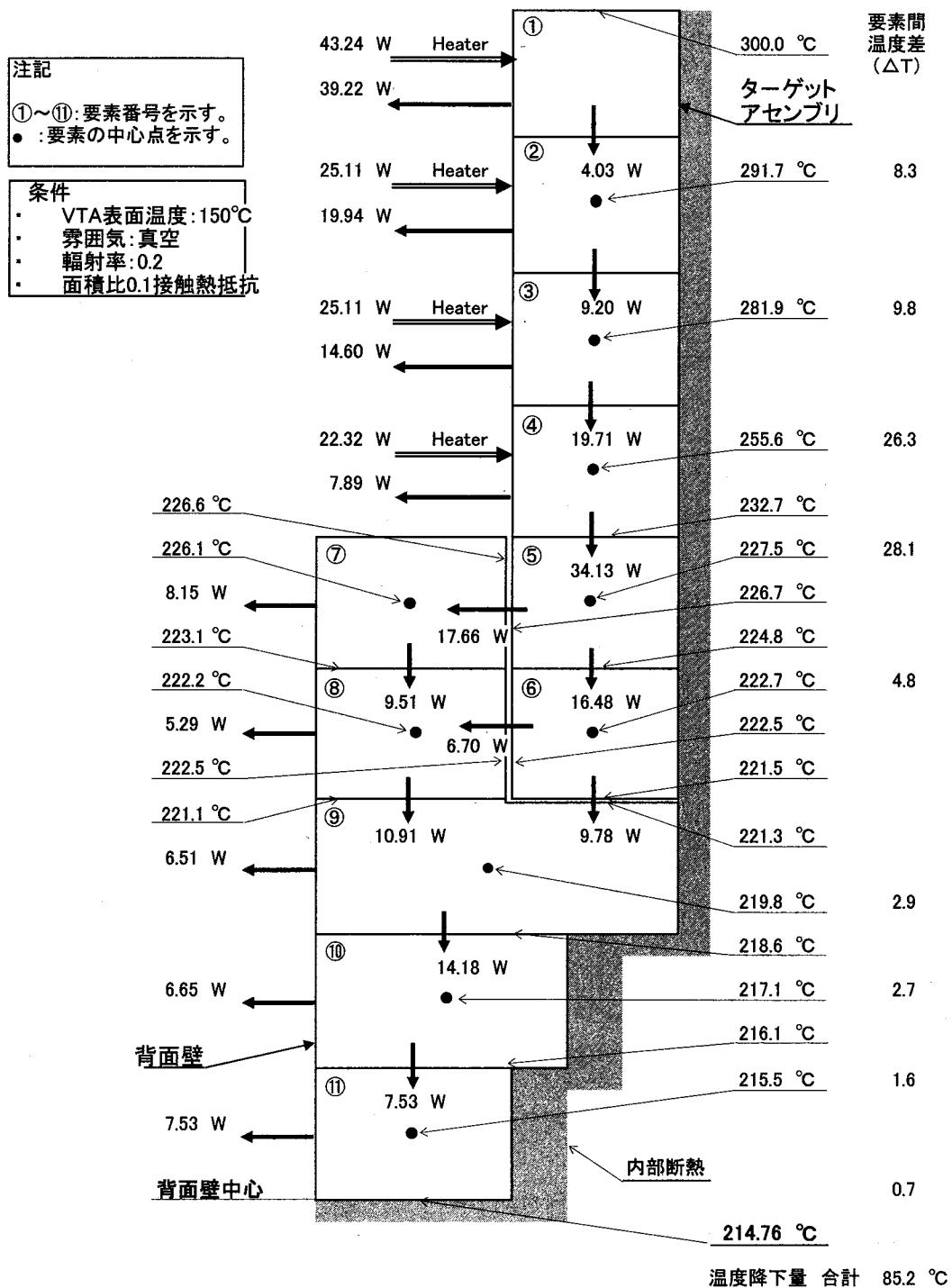
付録3.4 ターボ・アセンブリおよび背面壁の材質(SUS316)の熱伝導率



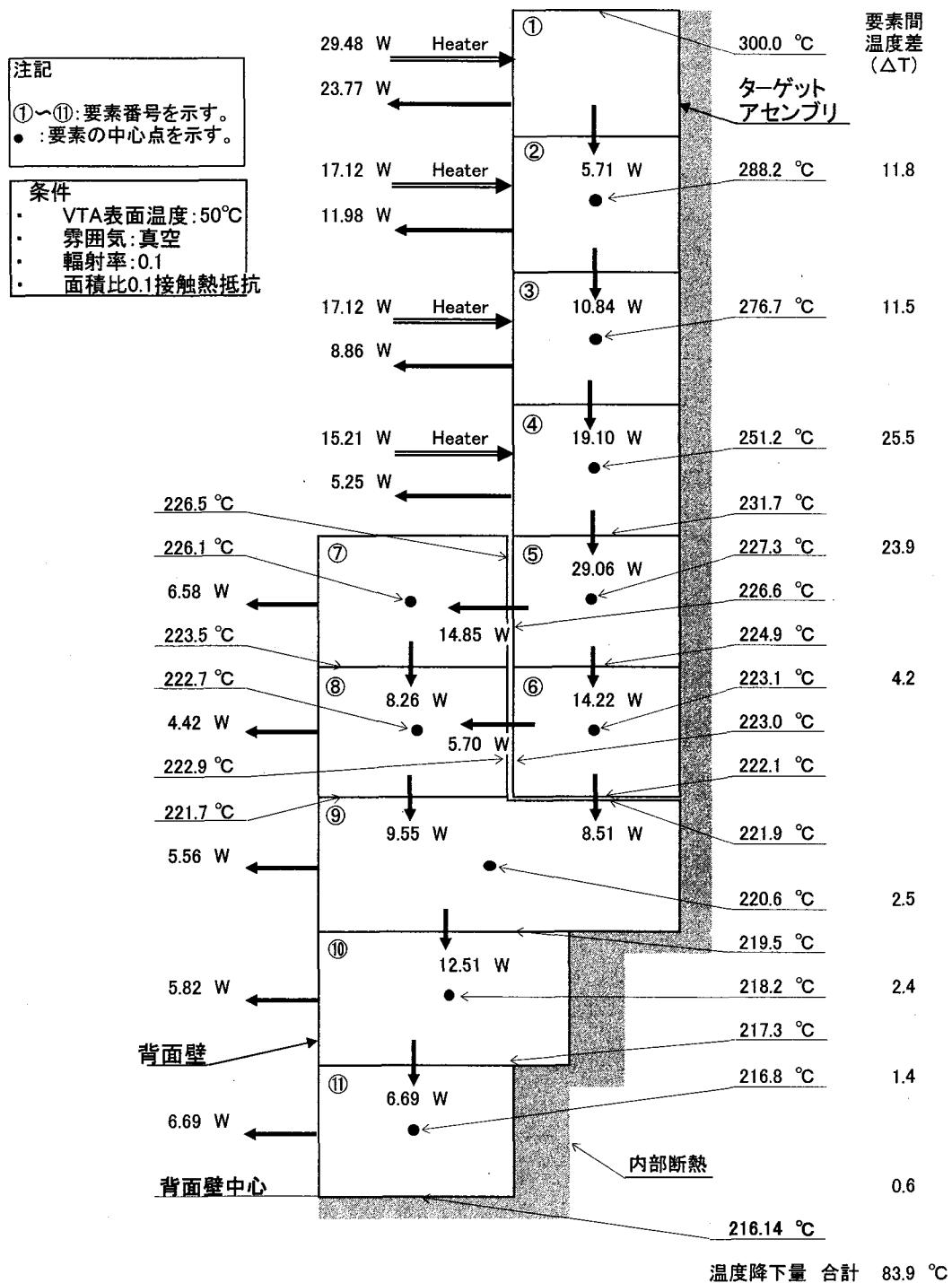
出典: ASME Sec. II Part D subpart2 Table TCD



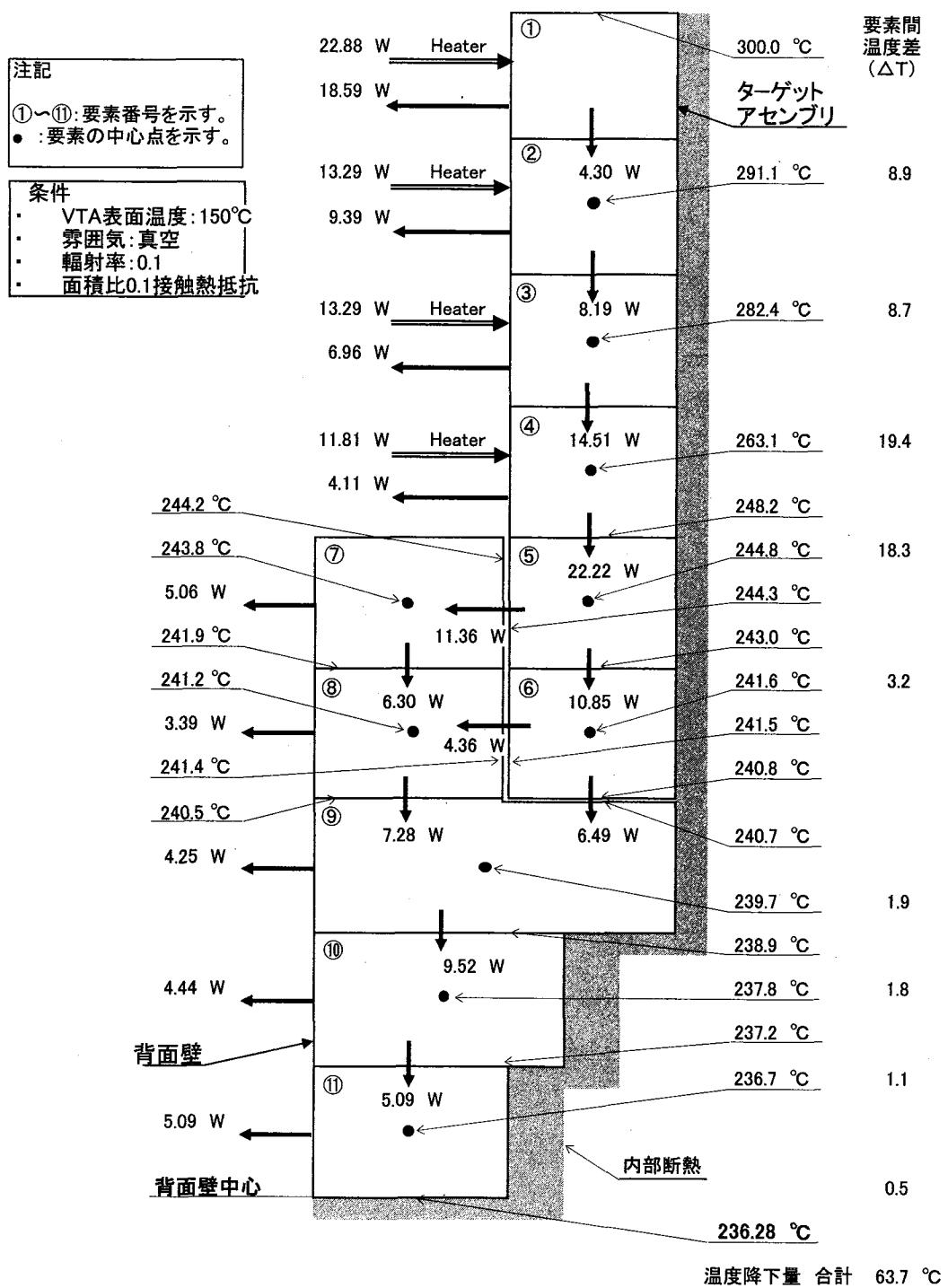
付録3.5(1) 温度およびヒーター入熱計算結果（ケースB001）



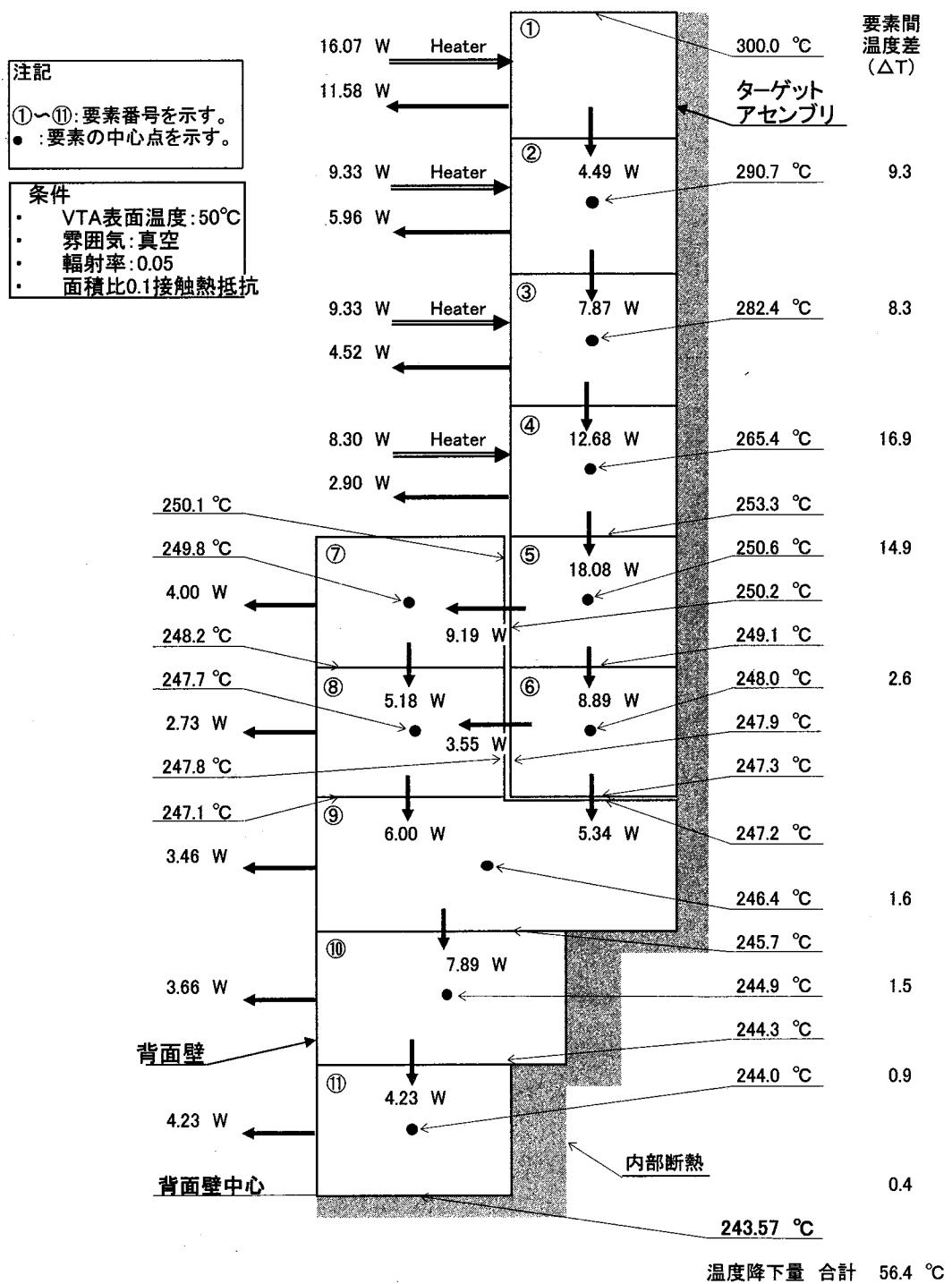
付録3.5(2) 温度およびヒーター入熱計算結果 (ケースB002)



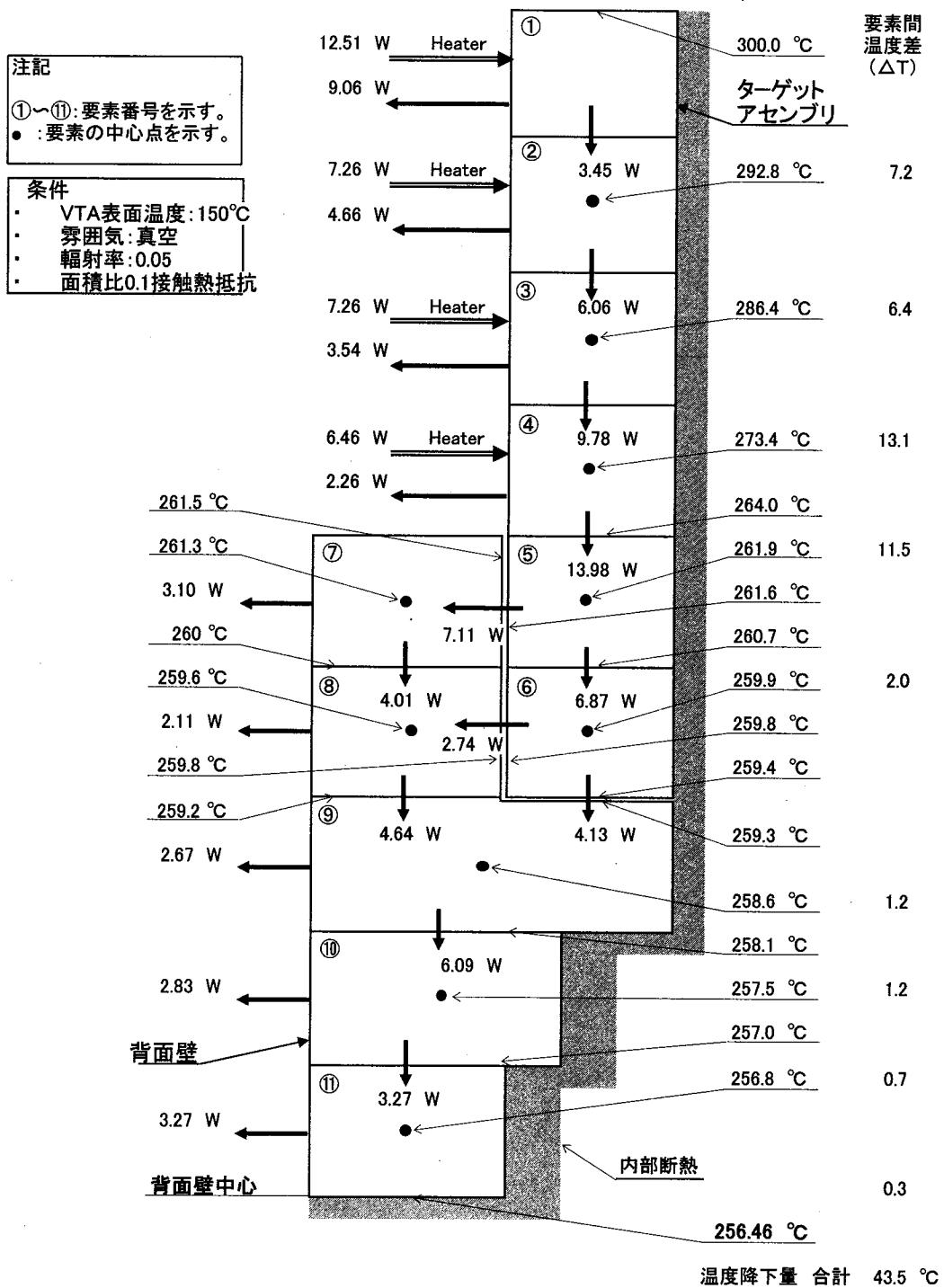
付録3.5(3) 温度およびヒーター入熱計算結果（ケースB003）



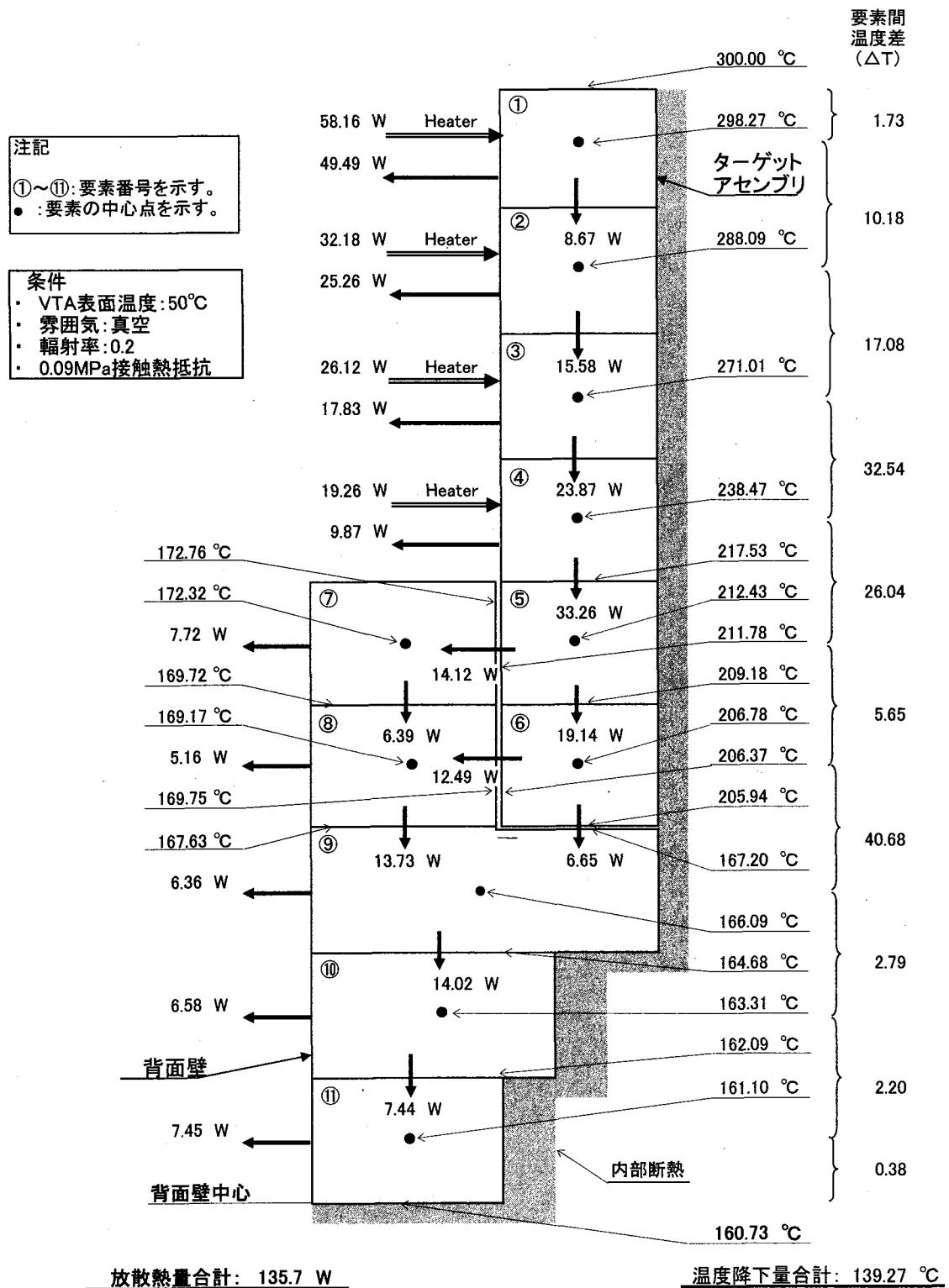
付録3.5(4) 温度およびヒーター入熱計算結果 (ケースB004)



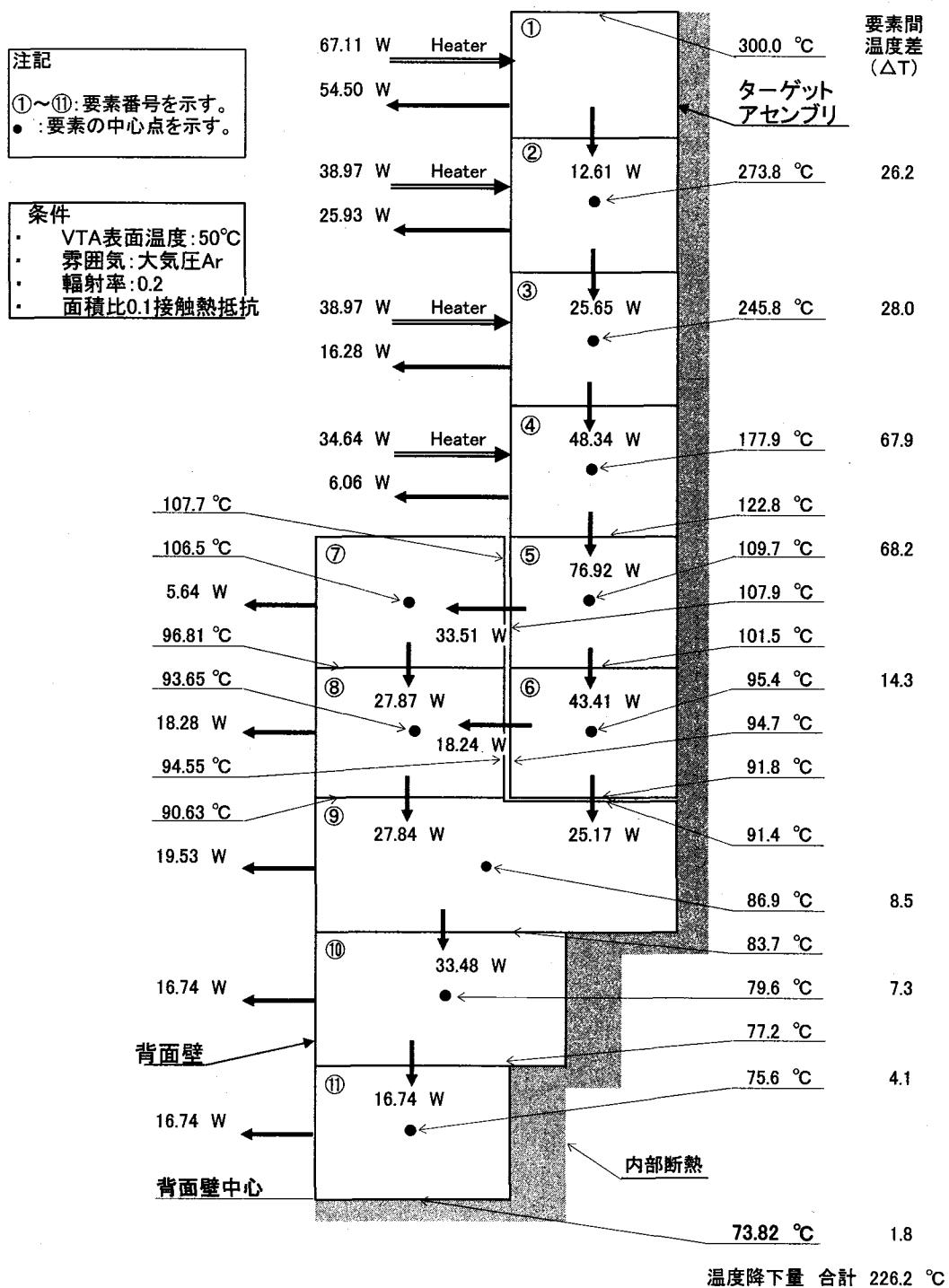
付録3.5(5) 温度およびヒーター入熱計算結果（ケースB005）



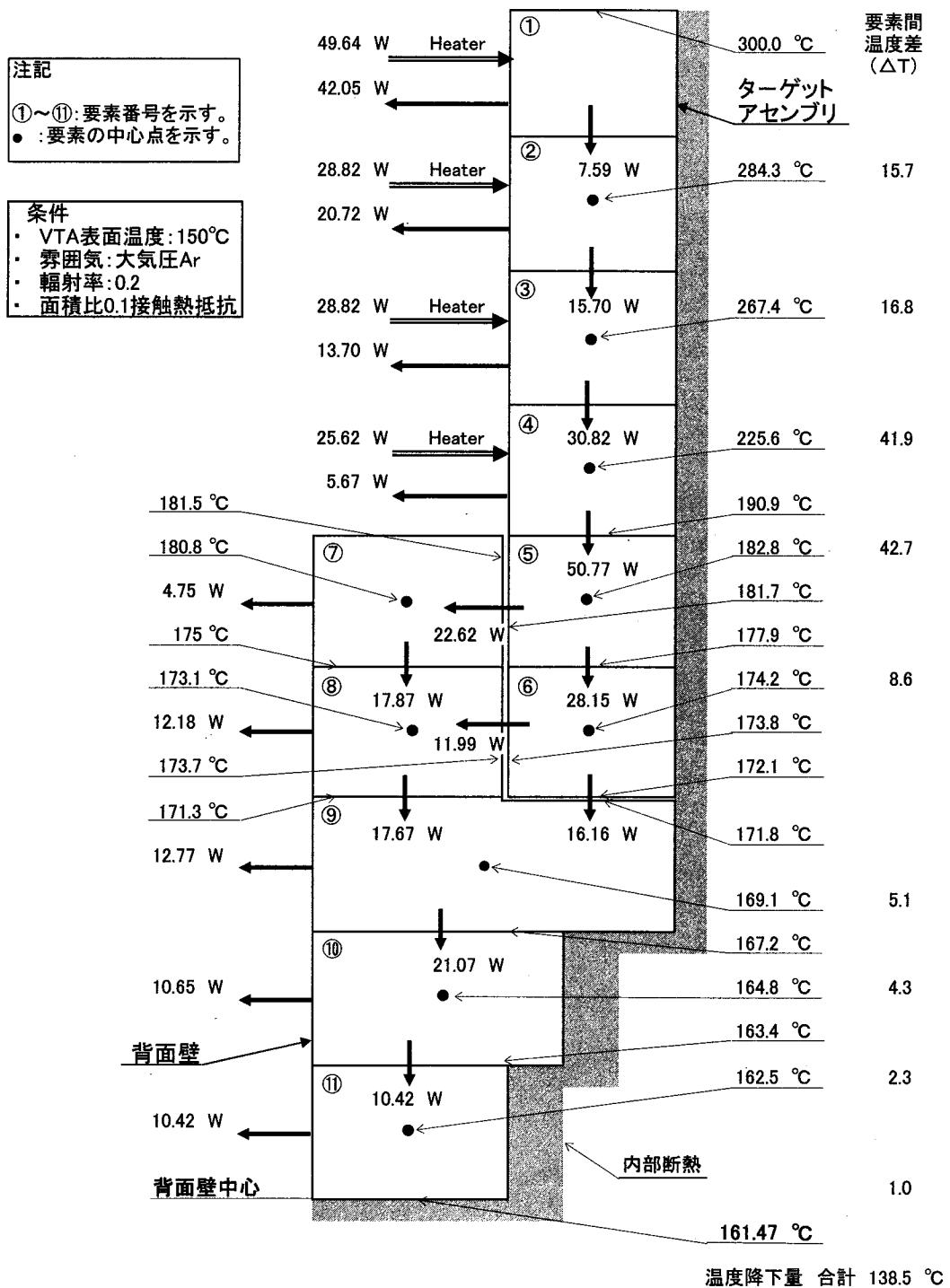
付録3.5(6) 温度およびヒーター入熱計算結果 (ケースB006)



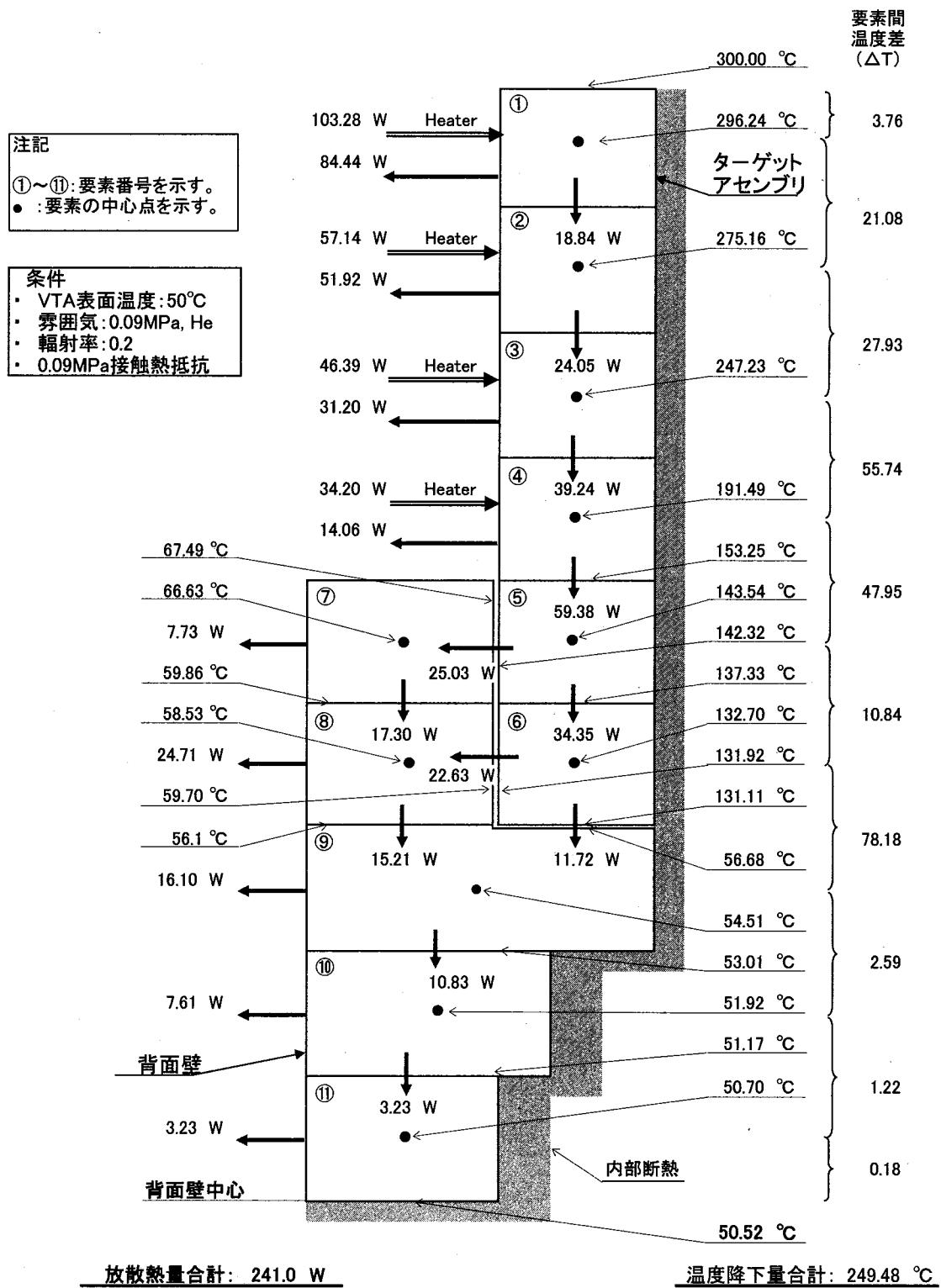
付録3.5(7) 温度およびヒーター入熱計算結果 (ケースB007)



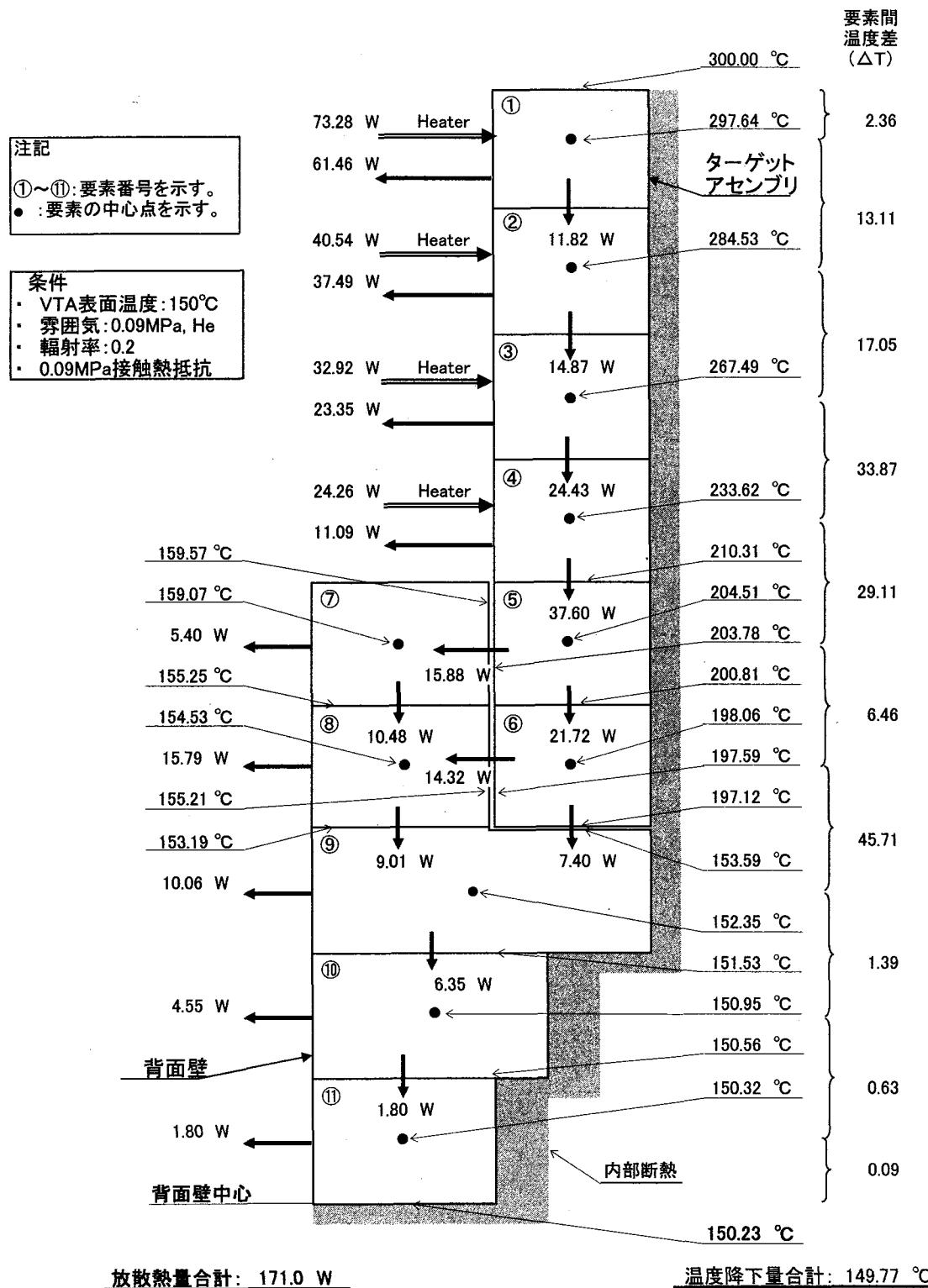
付録3.5(8) 温度およびヒーター入熱計算結果 (ケースB101)



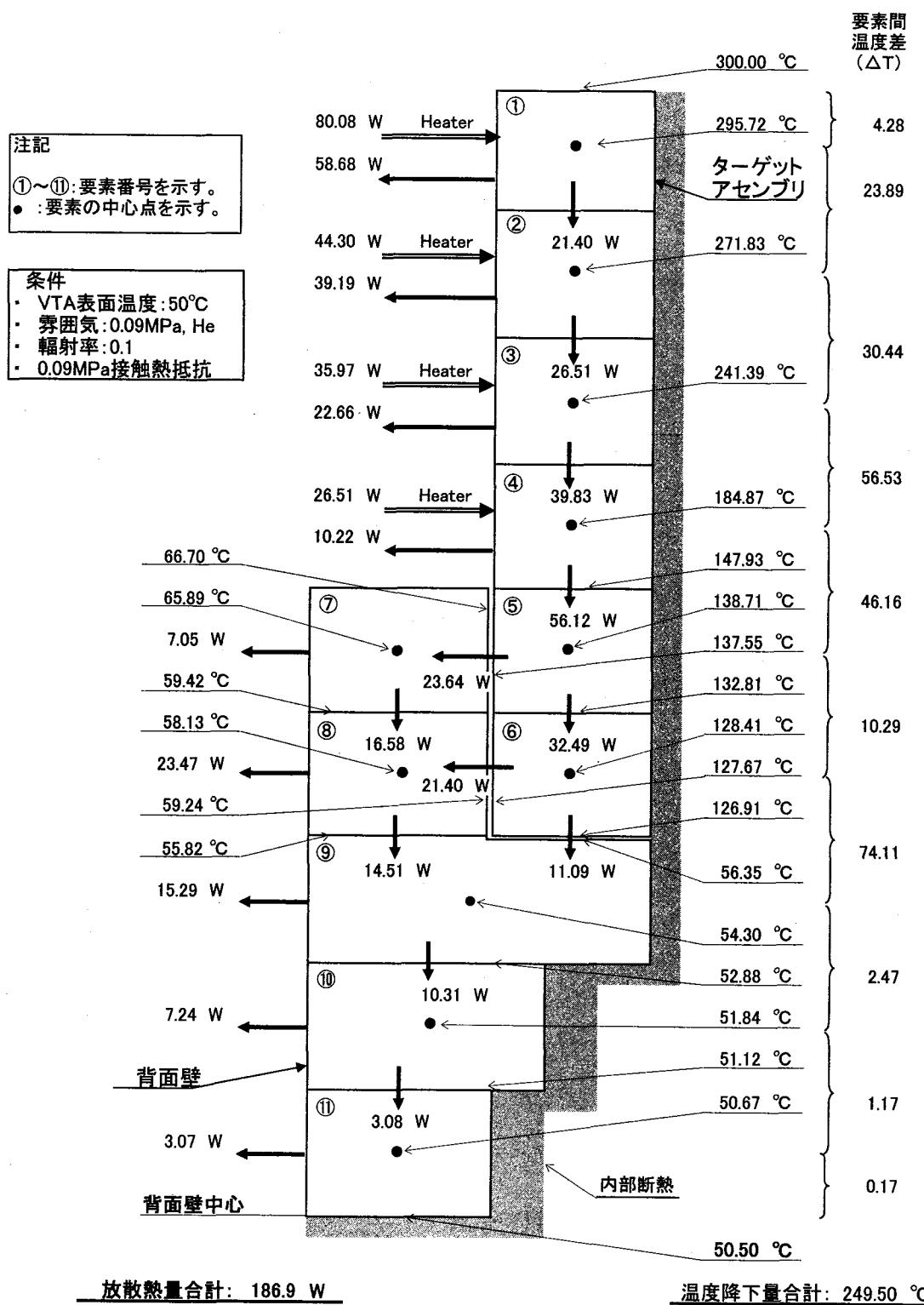
### 付録3.5(9) 温度およびヒーター入熱計算結果（ケースB102）



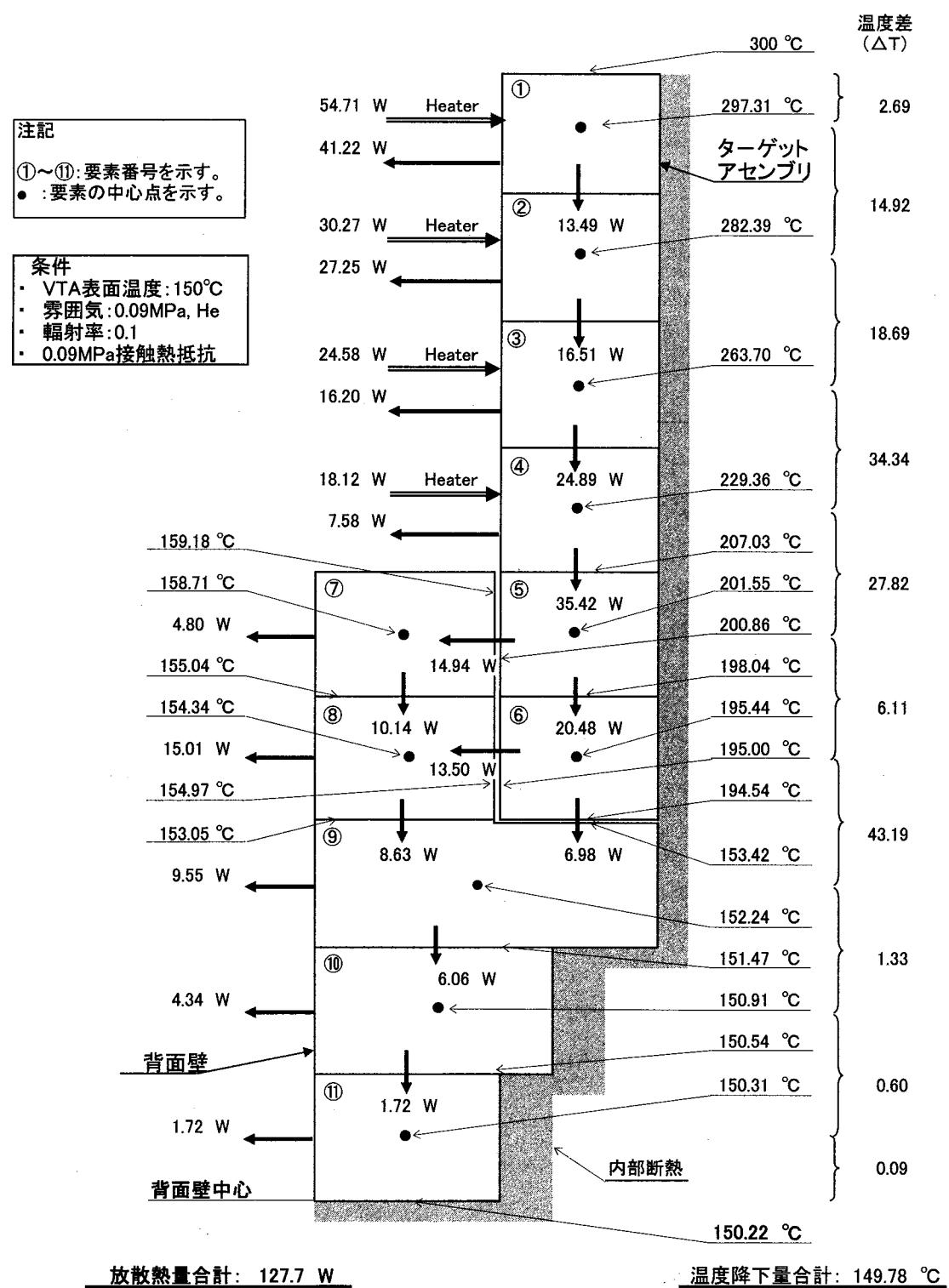
付録3.5(10) 温度およびヒーター入熱計算結果 (ケースB201)



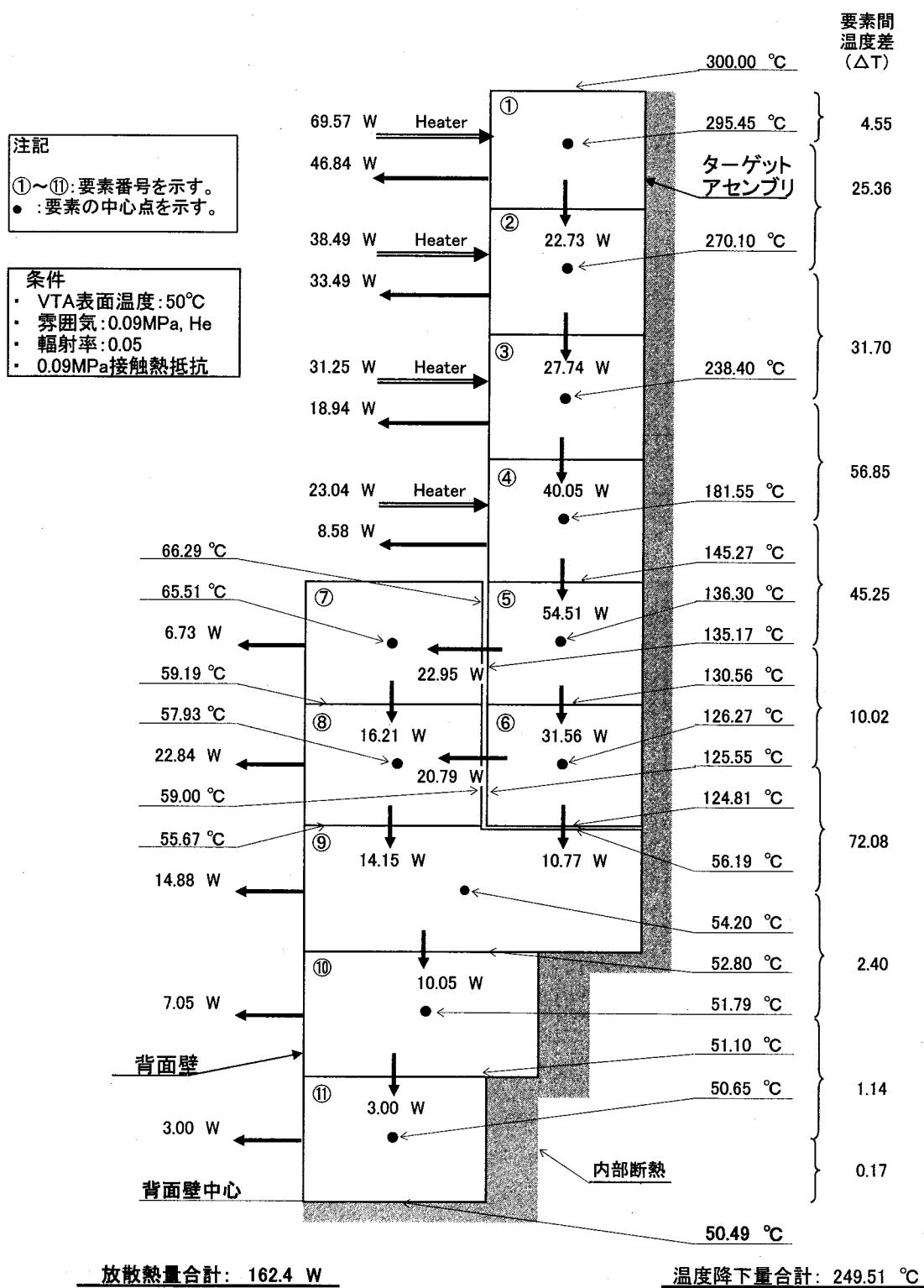
付録3.5(11) 温度およびヒーター入熱計算結果 (ケースB202)



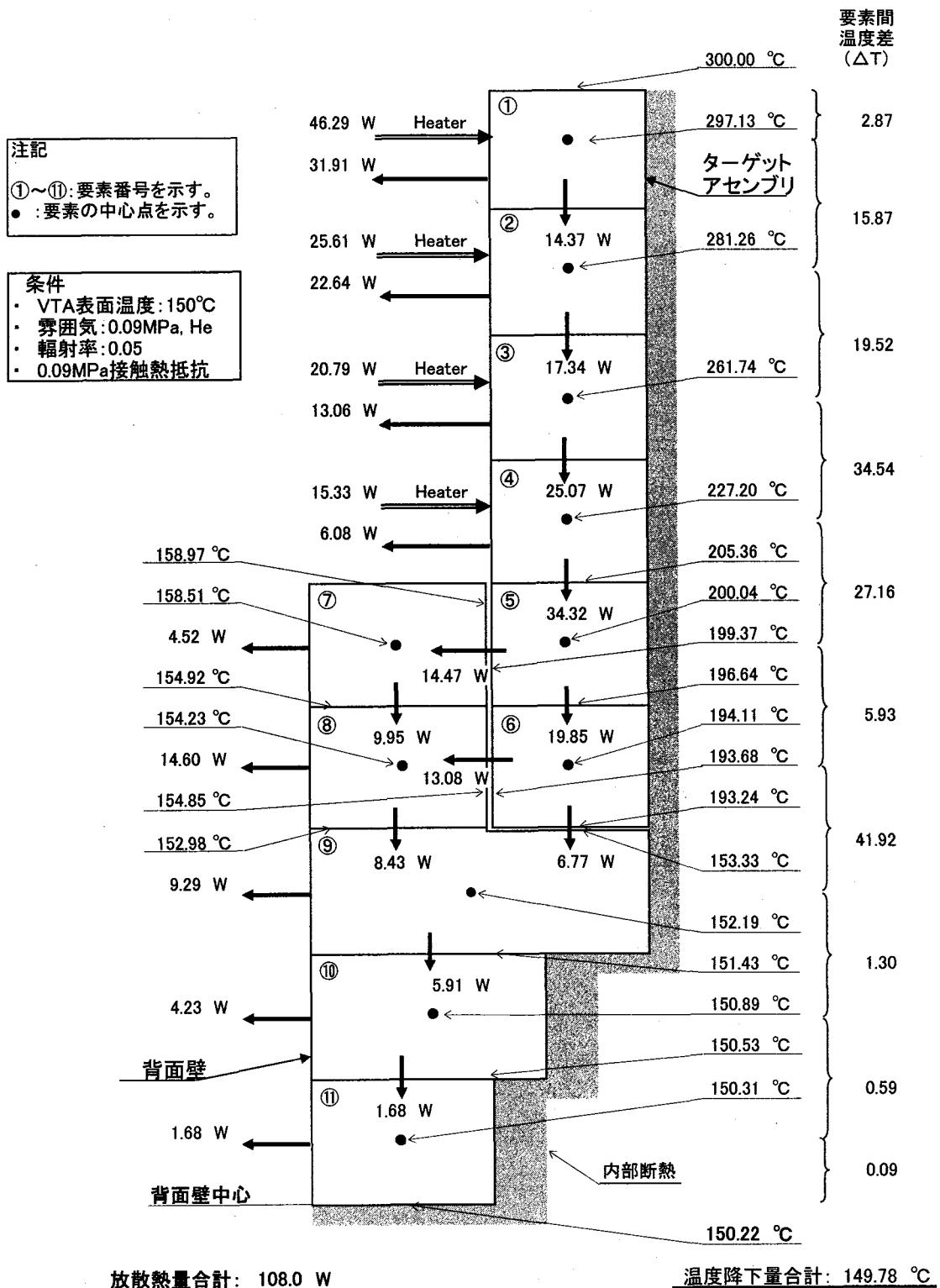
付録3.5(12) 温度およびヒーター入熱計算結果 (ケースB203)



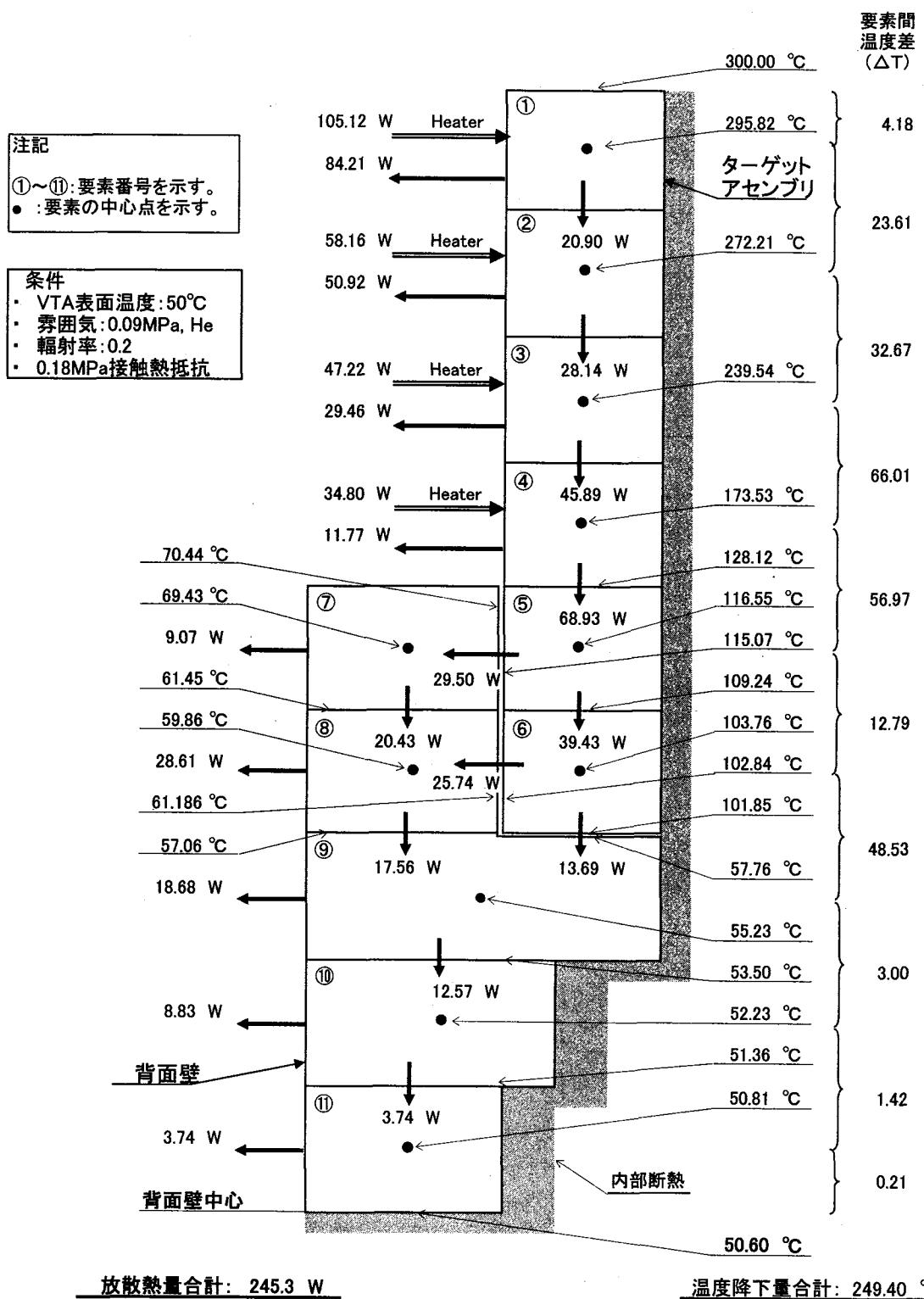
付録3.5(13) 温度およびヒーター入熱計算結果 (ケースB204)



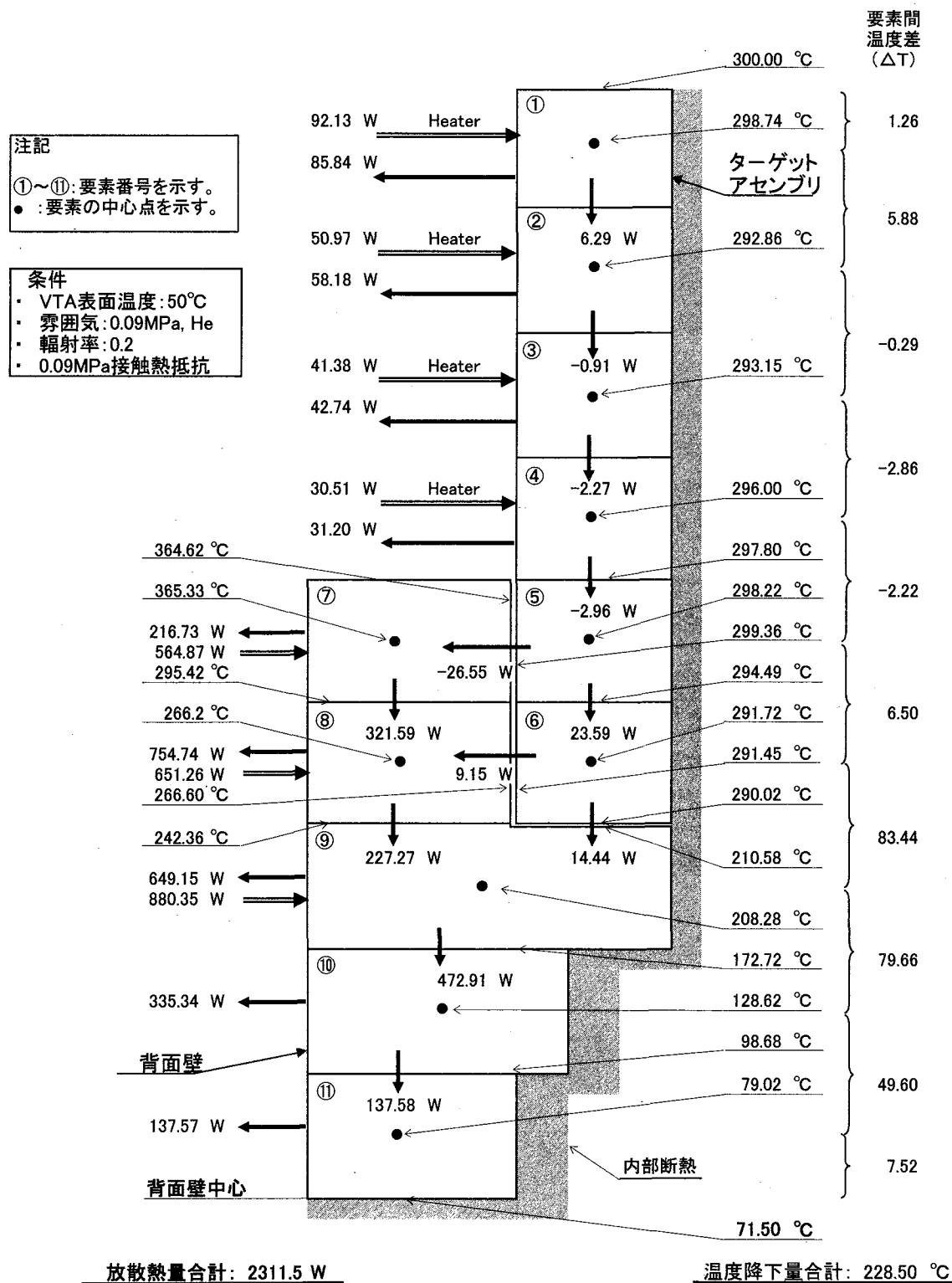
付録3.5(14) 温度およびヒーター入熱計算結果 (ケースB205)



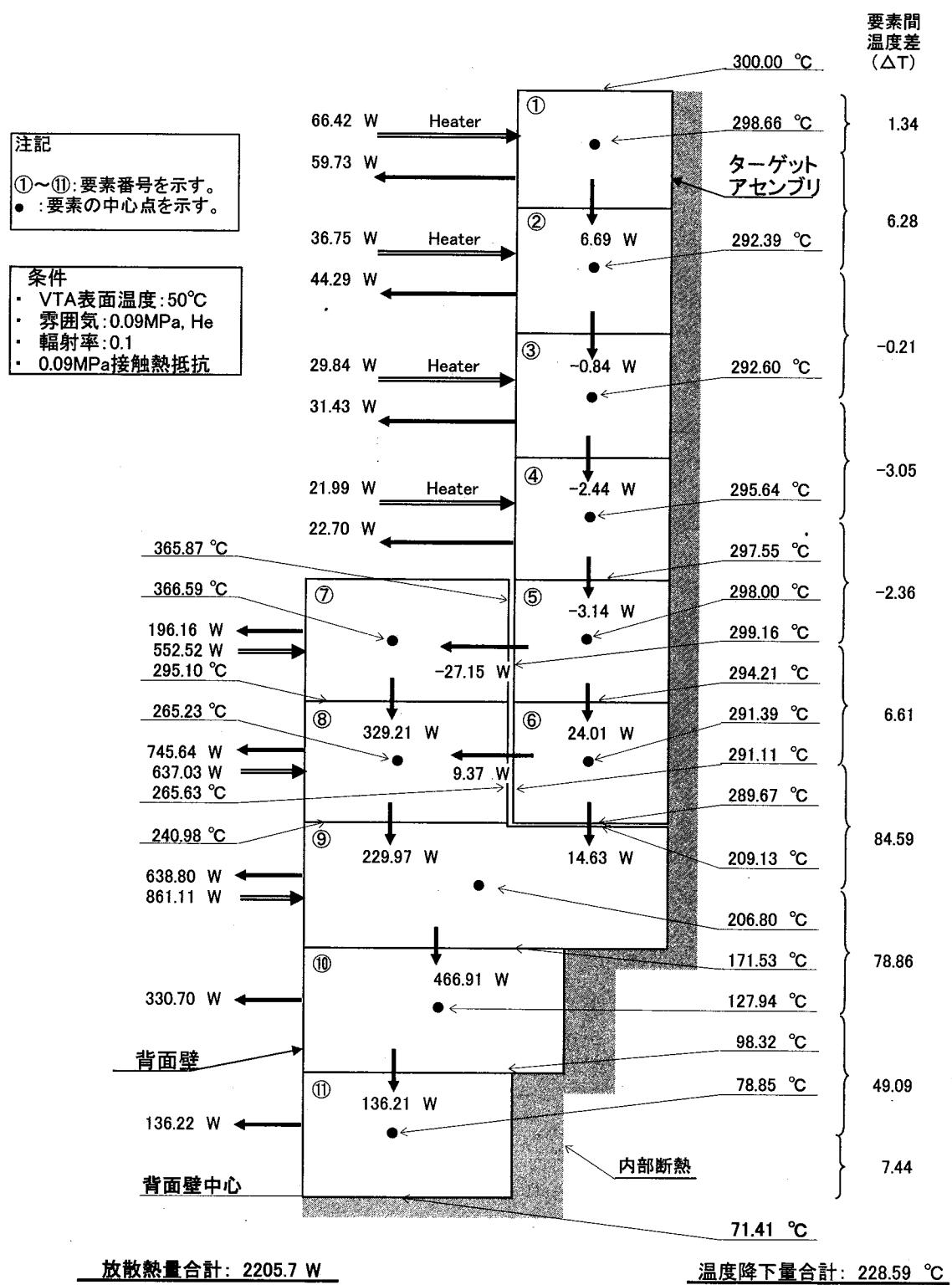
付録3.5(15) 温度およびヒーター入熱計算結果 (ケースB206)



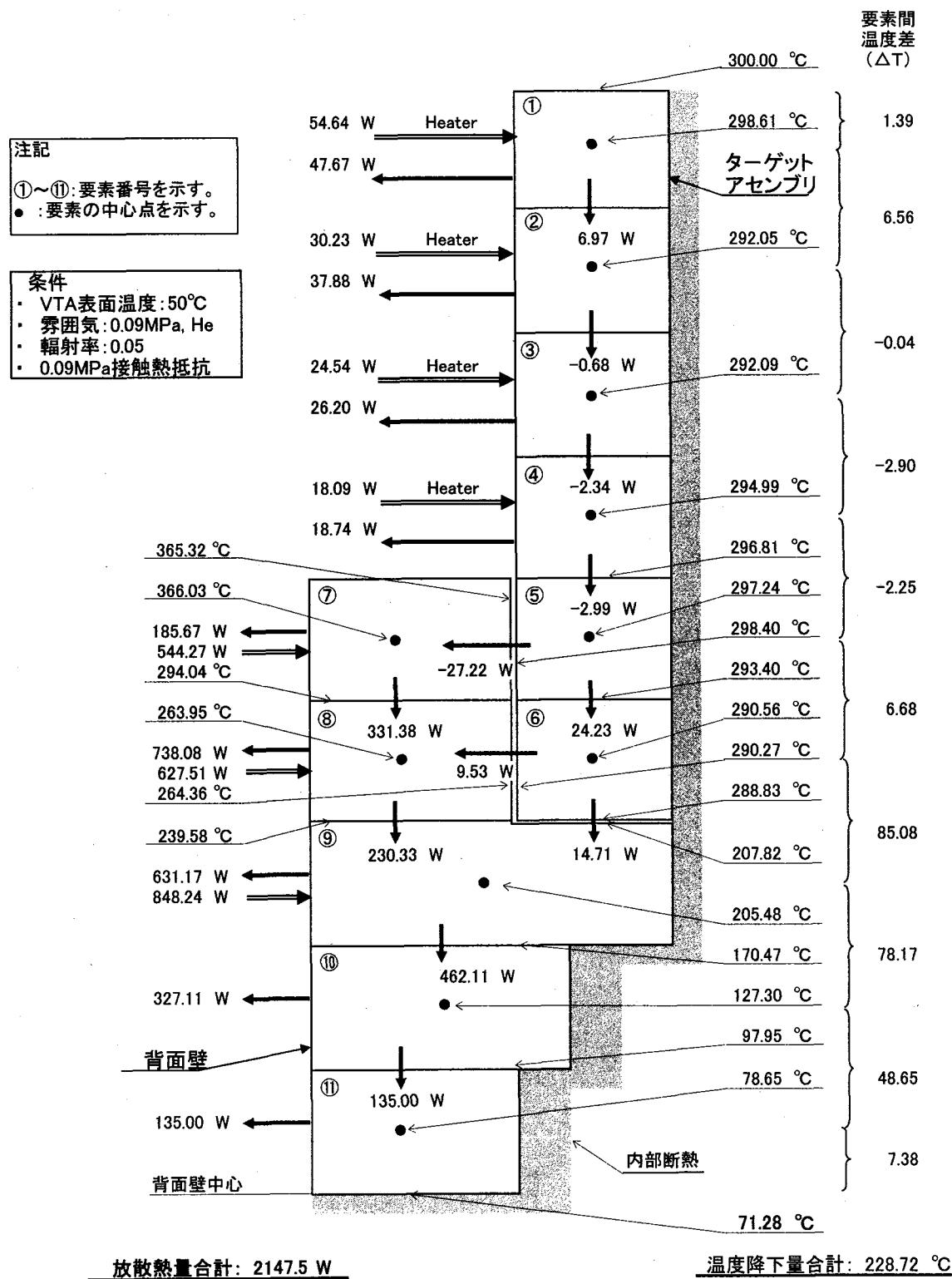
付録3.5(16) 温度およびヒーター入熱計算結果 (ケースB207)



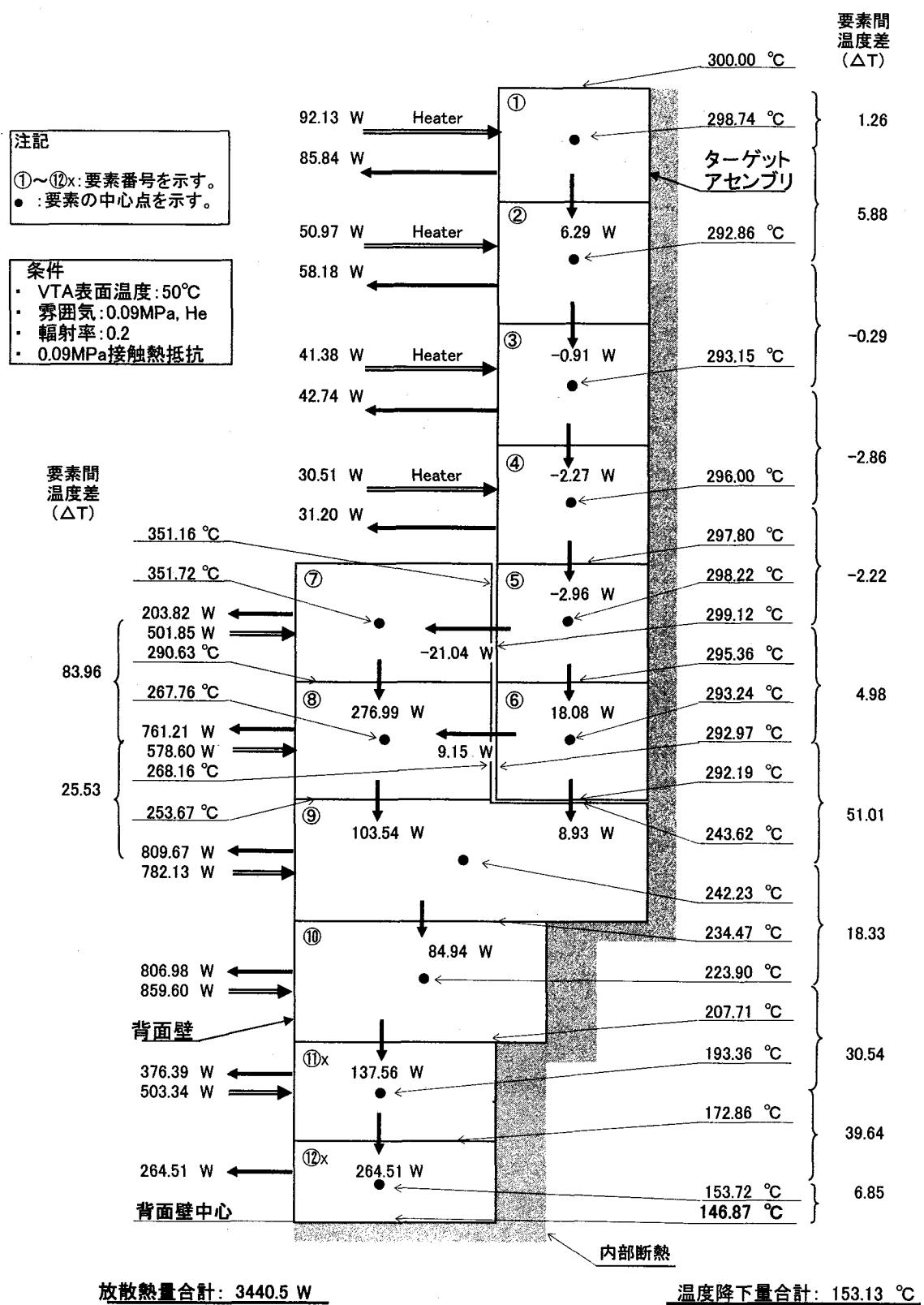
付録3.5(17) 温度およびヒーター入熱計算結果 (ケースB211、2.3kW入熱)



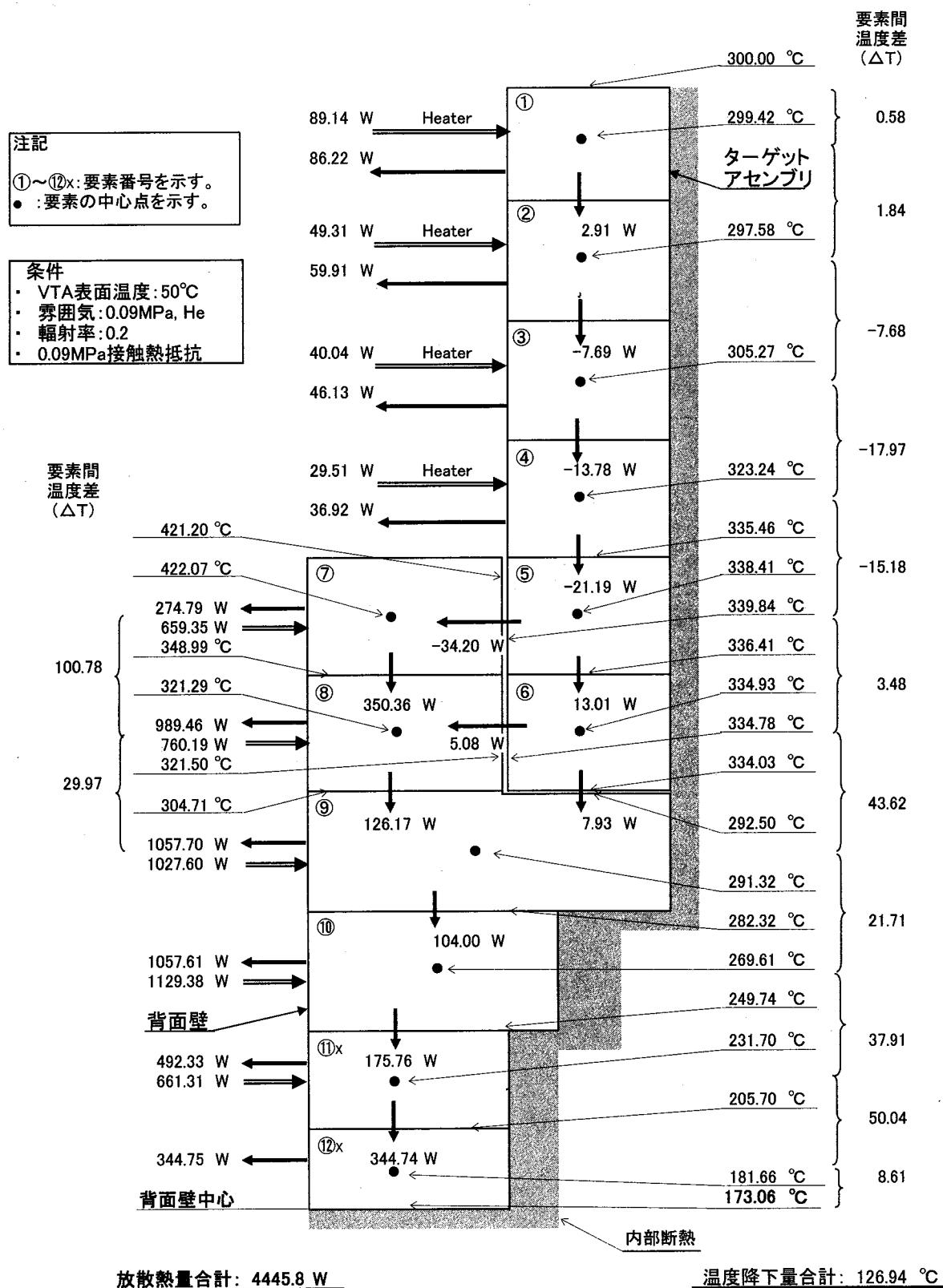
付録3.5(18) 温度およびヒーター入熱計算結果 (ケースB212、2.2kW入熱)



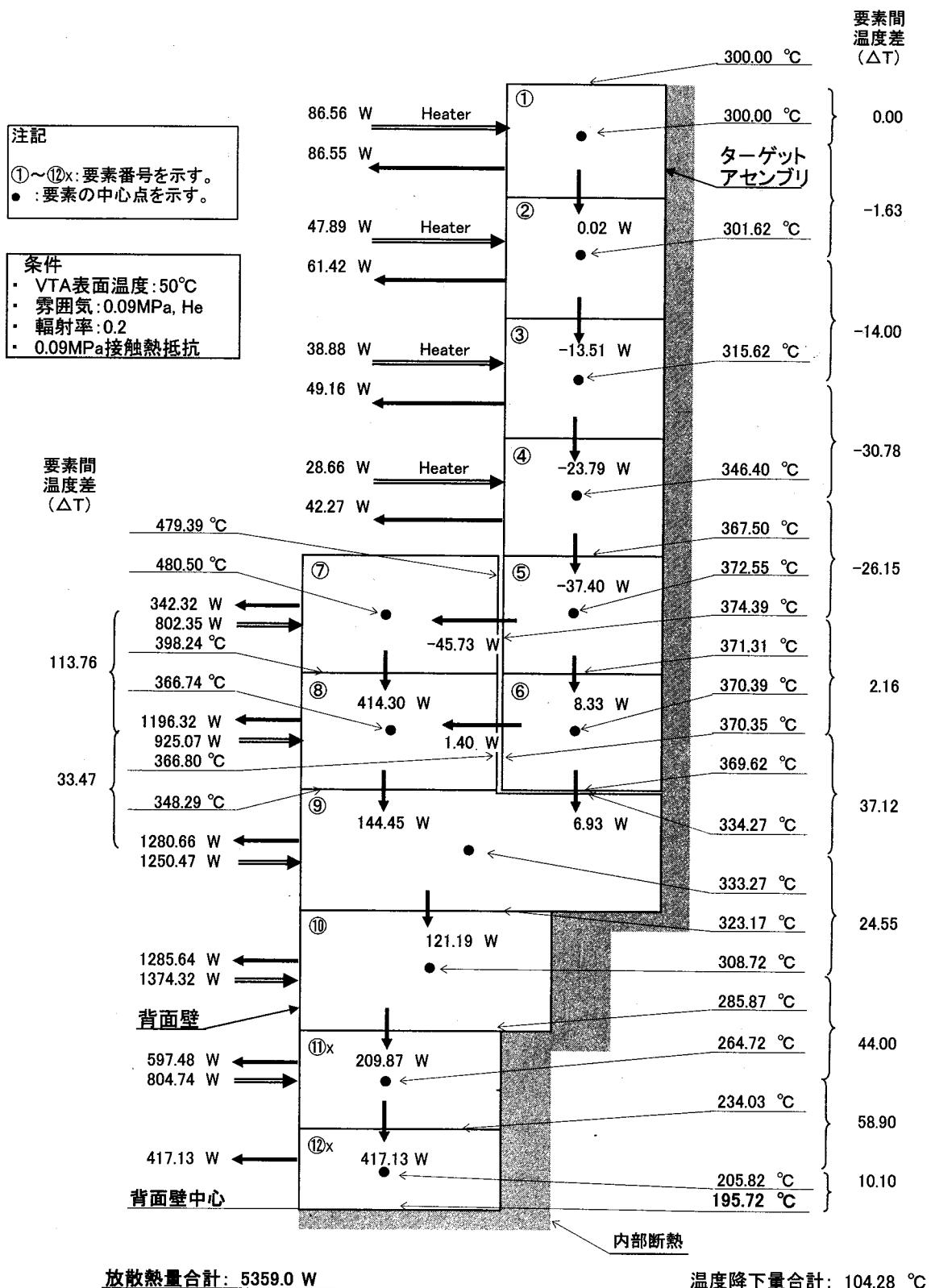
付録3.5(19) 溫度およびヒーター入熱計算結果 (ケースB213、2.1kW入熱)



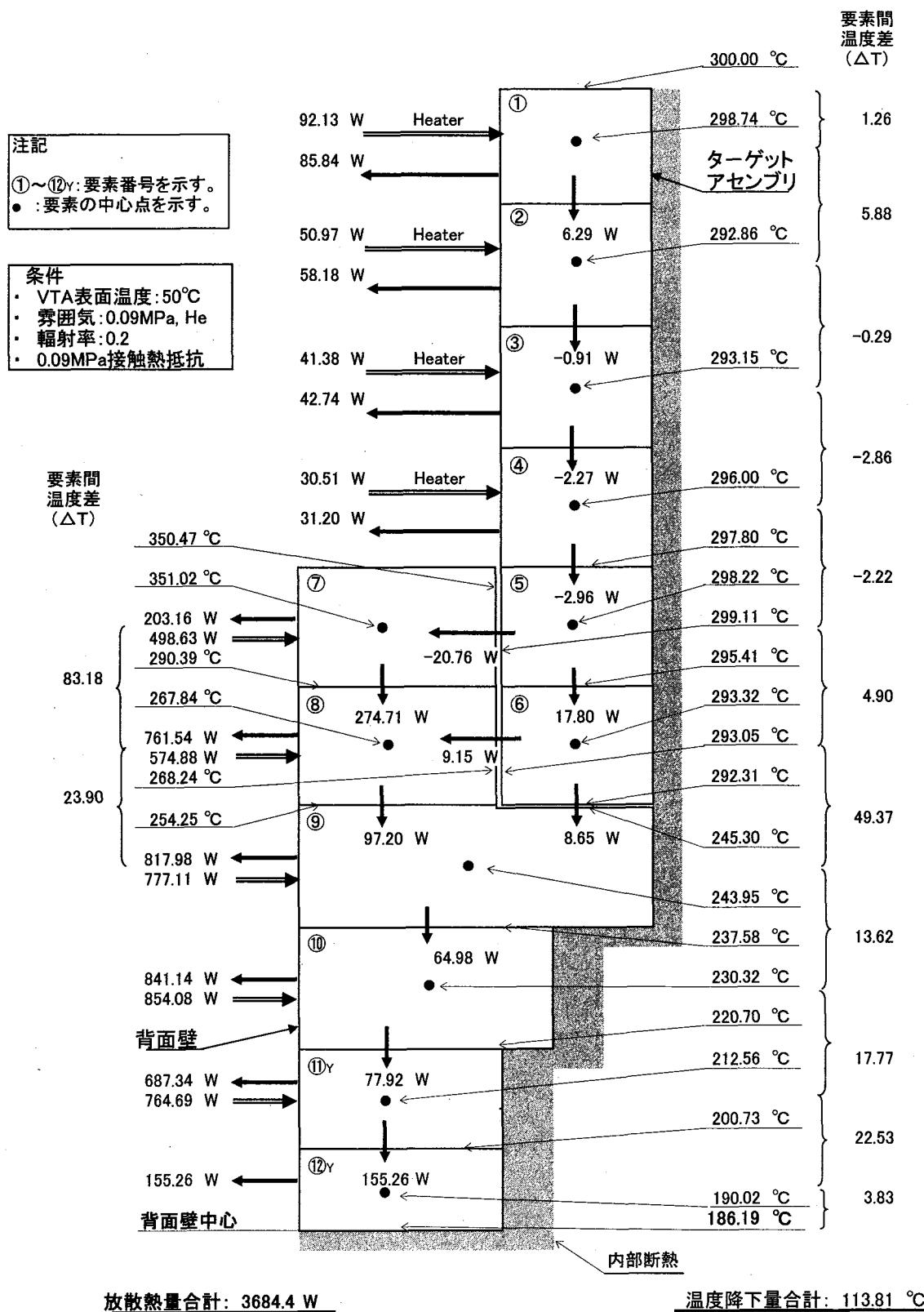
付録3.5(20) 温度およびヒーター入熱計算結果 (ケースB221、3.4kW入熱)



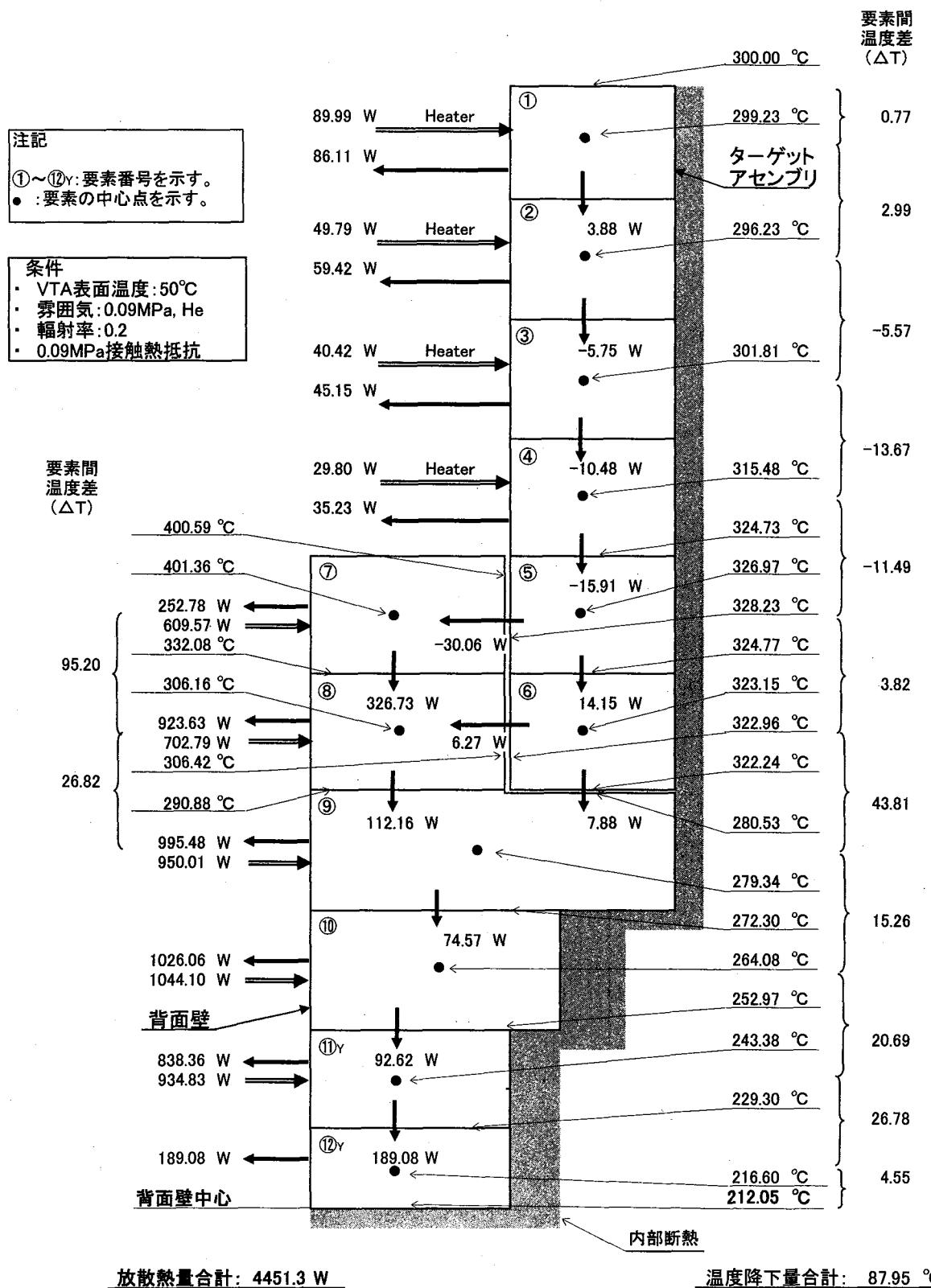
付録3.5(21) 温度およびヒーター入熱計算結果 (ケースB221、4.4kW入熱)



### 付録3.5(22) 温度およびヒーター入熱計算結果（ケースB221、5.4kW入熱）



付録3.5(23) 温度およびヒーター入熱計算結果 (ケースB231、3.7kW入熱)



付録3.5(24) 温度およびヒーター入熱計算結果 (ケースB231、4.5kW入熱)