

JMTR キャプセル照射温度評価法の開発

— 有限要素法「NISA」コードによる CT 試験片
及び2分割熱媒体の温度評価 —

Development of Evaluation Method on Irradiation Temperature for JMTR Capsule
- Temperature Valuation of CT Specimen and
Separated Specimen Holder by NISA FEM Code -

富田 健司 細川 甚作 松井 義典

Kenji TOMITA, Jinsaku HOSOKAWA and Yoshinori MATSUI

大洗研究開発センター

照射試験炉センター

原子炉施設管理部

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

July 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

JMTR キャプセル照射温度評価法の開発
ー有限要素法「NISA」コードによる CT 試験片及び 2 分割熱媒体の温度評価ー

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター
照射試験炉センター 原子炉施設管理部

富田 健司・細川 甚作・松井 義典

(2008 年 4 月 1 日受理)

平成 23 年度からの JMTR (Japan Materials Testing Reactor) 再稼働に向けて、材料照射キャプセルの高精度照射温度評価の検討を進めている。従来から有限要素法「NISA」コードを用いてキャプセル内の照射温度を容易に設計者が解析できるようサブプログラムを開発し、キャプセル設計に利用してきたが、複雑な形状の試験片等の解析には対応していなかった。

そこで、今後利用が見込まれる特殊な形状である CT 試験片の温度解析及び再照射キャプセルの熱媒体として有用と考えられる 2 分割熱媒体構造の温度解析ができるよう新たにサブプログラムを開発した。

開発したサブプログラムを用いて CT 試験片の温度解析の温度解析を実施した結果、CT 試験片内部の詳細な温度分布がわかり、熱応力的には問題になるような応力が発生しないことがわかった。また、2 分割熱媒体の構造では、各熱媒体の温度分布は異なるが、熱媒体が 2 分割型でも一体型場合でも照射試料の温度はそれほど変化を受けないことがわかった。

Development of Evaluation Method on Irradiation Temperature for JMTR Capsule
- Temperature Valuation of CT Specimen and Separated Specimen Holder by NISA FEM Code-

Kenji TOMITA, Jinsaku HOSOKAWA and Yoshinori MATSUI

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

(Received April 1, 2008)

Irradiation temperature evaluation with high accuracy in materials irradiation capsules installed in the JMTR (Japan Materials Testing Reactor) is a key investigation subject aiming at the re-operation from 2011 F. Y. Sub-programs for 3D-FEM NISA code were developed and employed so as to analyze easily the temperature profile within the capsules. However, the former developed sub-programs hardly analyze the temperature for complicated structure. Two kinds of sub-programs were, therefore, newly developed so that temperatures of CT specimens, which will be expected to install in the capsule, and separated specimen holders as heat medium are possible to analyze.

As a result of temperature analysis by the NISA code with newly developed sub-programs, we can get the detail temperature distribution of the CT specimen, and it was found that not so large thermal stress is produced by the temperature distribution within the specimen. Moreover, from the other temperature analysis for separated specimen holders it was found that the temperature of irradiated specimen hardly effected by types of specimen holders, separated one or not separated one, although each specimen holder has different temperature distribution in case of the separated specimen holders.

Keywords : 3D-FEM Analysis, Temperature Analysis, Irradiation Capsule, CT Specimen, JMTR

目次

| | |
|-------------------------|---|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. CT試験片のキャプセル装荷 | 2 |
| 2.1 計算方法 | 2 |
| 2.2 計算条件 | 2 |
| 2.3 計算結果 | 2 |
| 3. 2分割熱媒体のキャプセル装荷 | 3 |
| 3.1 計算方法 | 3 |
| 3.2 計算条件 | 3 |
| 3.3 計算結果 | 4 |
| 4. まとめ | 4 |
| 謝 辞 | 5 |
| 参 考 文 献 | 5 |

Contents

| | |
|--|---|
| 1. Introduction..... | 1 |
| 2. Loading CT specimen into the irradiation capsule | 2 |
| 2.1 Calculation Method | 2 |
| 2.2 Calculation Condition | 2 |
| 2.3 Results of Calculation | 2 |
| 3. Loading separation specimen holder into the irradiation capsule | 3 |
| 3.1 Calculation Method | 3 |
| 3.2 Calculation Condition | 3 |
| 3.3 Results of Calculation | 4 |
| 4. Conclusions | 4 |
| Acknowledgements..... | 5 |
| References..... | 5 |

This is a blank page.

1. はじめに

JMTR は原子炉施設の更新及び照射装置の整備を行い、平成 23 年度再稼働に向けて準備を進めている。材料照射については照射温度設計及び評価の高精度化を適時、進めており、約 10 年前から有限要素法「NISA (Numerically Integrated Elements For Analysis)」コードを導入して解析を行ってきた。JMTR ではキャプセル設計者が誰でも容易に 3 次元の温度解析、温度評価ができるように「NISA」コードにサブプログラム¹⁾を追加して、寸法、材料、発熱等の計算条件を入力するだけで、温度評価できるように整備を進めている。平成 19 年度は新たに以下の 2 項目の解析を行えるようサブプログラムを開発し、「NISA」コードに追加した。

1 つ目は、複雑な CT 試験片をキャプセル内に組み込むサブプログラムである。今までは試験片を矩形形状として温度分布を評価してきたが、複雑な形状の CT 試験片 (1 インチサイズ Compact Tension 試験片を Fig1-1 に示す) では温度分布も矩形形状と異なり複雑となる可能性がある。したがって、試験片内の温度分布を精度良く求めるために、キャプセル内に CT 試験片をモデル化して、温度分布を計算できるようにした。また、求めた温度分布から発生する熱応力についても解析できるようサブプログラムを開発した。

2 つ目は、キャプセルの構造材である熱媒体を 2 分割して評価するサブプログラムである。現在、検討を進めている再照射試験は、キャプセルを一度照射した後、照射試料を取出して外観、寸法検査後、再度キャプセルに組込み、再度照射を繰り返して行う試験である。通常、熱媒体は円柱形状の 1 体ものであるが、このような再照射キャプセルの組立作業はホットセル内で行うため、マンipレータで容易に照射試料の取出し、再装荷ができる構造に設計する必要がある。この対策として熱媒体を 2 分割にすることが有効と考える。熱媒体が一体である場合は、試料の発熱は熱媒体から外筒に伝わりキャプセル表面でほぼ均等に除熱されるが、熱媒体を 2 分割する場合は、その隙間による熱抵抗増加の影響からキャプセル内の温度分布が不均一になる可能性がある。また、2 分割にした熱媒体の隙間が何らかの原因で照射中に広がる可能性もあり、これによる温度変化を十分制御できるかどうか確認しておく必要がある。これらの温度評価を可能とするため、2 分割熱媒体をキャプセルに装荷するサブプログラムの開発を行った。

本報告書は、上記に示した (1) CT 試験片のキャプセル装荷サブプログラム、(2) 2 分割熱媒体のキャプセル装荷サブプログラムの開発及びこれらのサブプログラムを使用したキャプセル照射温度の評価結果についてまとめたものである。

2. CT 試験片のキャプセル装荷

キャプセルに装荷された CT 試験片 (Fig2-1 に 1 インチサイズの CT 試験片のキャプセル断面図を示す) は、上部につかみ部やき裂導入部の隙間があり、複雑な温度分布になるものと考えられる。しかし、現状の「NISA」コードのサブプログラムでは単純な矩形形状の試験片のしか評価できず、CT 試験片のような複雑な形状の温度分布は制度良く評価することが出来なかった。そこで今回、キャプセル内に CT 試験片を装荷できるようサブプログラムを追加した。

2.1 計算方法

CT 試験片のキャプセル装荷サブプログラムには、CT 試験片の形状を模擬するためつかみ部 (2 個)、き裂導入部の上の隙間部分 (1 個) を作成している。この 3 箇所スペースを配置し、そのスペースの材質、ギャップ寸法等を指定できるようにした (Fig2-2 参照)。このとき、模擬 CT 試験片形状は実際の CT 試験片形状 (Fig1-1) の A 部の寸法を簡略化している。この模擬した試験片を今まで温度解析していたサブプログラムに導入し、今までと同様の温度評価を行う。

2.2 計算条件

計算条件を下記に示す。

- 構造物の寸法、材質及び解析条件

| | | |
|-------------|--------------------------------|-----------|
| CT 試験片 | 62.5×60.0×25mm | 材質 A533B |
| CT 試験片用スペース | 片ギャップ 0.1mm | 材質 A533B |
| キャプセル外筒 | φ110×φ103mm | 材質 SUS316 |
| 熱媒体外径 | φ102.6~102.8mm | 材質アルミニウム |
| 熱媒体試験片室穴寸法 | 62.7×60.2×25mm、62.9×60.4×25mm | |
| ギャップ雰囲気 | ヘリウムガス | |
| キャプセル表面熱伝達率 | 0.0233W/mm ² ・K | |
| 冷却水温度 | 50 (°C) | |
| ガンマ発熱率 | 0.76W/g (鉄相当)、0.54W/g (アルミニウム) | |

2.3 計算結果

CT 試験片の温度分布 (Fig2-3 参照) は、単純な矩形として評価した温度分布 (Fig2-4 参照) と比べて、若干つかみ部とき裂導入部上部に不連続部が発生するものの、基本的にき裂部の評価部分は単純な矩形形状と差が無いことがわかる。また、CT 試験片用のスペースをつけた状態 (Fig2-5 参照) とスペースがない状態 (Fig2-6 参照) と比べた結果、温度分布はつかみ部、き裂導入部上部に入れるスペースの有無によって変化し、CT 試験片の重要な評価位置部分であるき裂部分付近では約 5°C 程度変化することが確認できた。

試験片には温度分布により熱応力が発生する。この熱応力がき裂部分に及ぼす影響を検討するため、熱応力分布も解析できるようにした。解析の結果、A533B のような熱伝導率の良い材料で

1 インチサイズの大きな CT 試験片 (図 2-7a、b 参照) に関しては、亀裂先端部分に熱応力が発生するが、応力値の差はとして 2kg/mm^2 程度で材料の強度とし保守的な評価である設計応力強さ (18.8kg/mm^2) の約 10%程度で試料の破壊等の問題は生じないことがわかった。スペーサのある場合とない場合についても応力値の差は 1%程度で強度的な問題は生じないことが明らかになった (Fig2-8a、b 参照)。ただし、照射下で亀裂進展を調べるような照射試験を行う時には、この熱応力の効果も考慮する必要がある。

3. 2 分割熱媒体のキャプセル装荷

2 分割熱媒体では 1 体形状ものの熱媒体にはない熱媒体間の隙間が存在することから、照射試料のガンマ発熱による熱は単純な熱伝導で評価できない可能性がある。したがって、熱媒体の隙間に起因する熱抵抗により試料の温度分布が変化し、評価部の温度にも影響すると考えられる。このため、2 分割熱媒体の温度解析ができるようサブプログラムを開発し、どの程度の温度影響を生じるか検討した。

3.1 計算方法

熱媒体を 2 分割にし、熱媒体間の隙間を 0.1mm とした場合の熱媒体の温度及び照射試料の温度を通常のキャプセルの温度解析方法と同様に求める。ギャップ雰囲気は大気圧のヘリウムガスとする。

また、熱媒体が 2 分割であるため、熱媒体の隙間が設計時の隙間より広がってしまった場合を想定し、照射試料の温度変化及び熱媒体温度変化を調べるとともに、照射中に隙間が広がった場合を想定し、照射試料の温度変化が温度制御範囲内であるかどうかを検討する。解析では、キャプセル内径と熱媒体外径の片ギャップ寸法を 0.1mm のまま変更せず、2 分割熱媒体の隙間を 0.15mm に変更した。すなわち、熱媒体に設けた試験片挿入用穴寸法をそれぞれ 4 方向に 0.125mm ずつ広げて、照射試料を大きい熱媒体側に 0.025mm 変位させてモデル化した。これにより、見かけ上、照射試料は 3 方向で 0.1mm (実際の短辺方向は 0.125mm) で、小さい熱媒体が一方向だけ、 0.1mm から 0.15mm に広げられたこととなる。

3.2 計算条件

計算条件を下記に示す。

- 構造物の寸法、材質及び計装

| | | |
|-------------|--------------------------------------|-----------|
| 照射試験片 | $10.0 \times 1.6 \times 50\text{mm}$ | 材質ハフニウム |
| キャプセル外筒 | $\phi 30 \times \phi 27\text{mm}$ | 材質 SUS316 |
| 熱媒体外径 | $\phi 26.8\text{mm}$ | 材質アルミニウム |
| 2 分割熱媒体間の隙間 | $0.1 \sim 0.15\text{mm}$ | |

| | |
|-------------|--|
| 熱媒体試験片室穴寸法 | 10.2×1.8×50mm 10.25×1.85×50mm (ただし、照射試料は 0.025mm 変位させる) |
| ギャップ雰囲気 | ヘリウムガス |
| キャプセル表面熱伝達率 | 0.0233W/mm ² ・K |
| 冷却水温度 | 50 (°C) |
| ガンマ発熱率 | 7.42W/g (鉄相当)、6.38W/g (アルミニウム)、 17.14W/g (ハフニウム) |

3.3 計算結果

キャプセル内の熱媒体が 2 分割される場合、熱媒体間の隙間 (0.1mm) のヘリウムガス層の影響と照射試料の接する面からの熱伝導の影響によって、照射試料を 3 面に配置する熱媒体 (試料 3 面側 : Fig3-1 の下側 (最高 144°C)) と、1 面の熱媒体 (試料 1 面側 : 上側 (最高 136.5°C)) で約 8°C の温度差がつくことがわかった。しかし、熱媒体の温度差に対して、照射試料温度については 2 分割熱媒体 (Fig3-2 参照) も 1 体の熱媒体 (Fig3-3 参照) もほぼ同じ 220°C であることが明らかになった。

2 分割熱媒体の隙間の距離を 0.15mm に変更した場合、0.1mm の時の照射試料温度が 220°C に対して、233°C (Fig3-4 参照) と約 10°C 温度上昇するが、照射試料の温度分布としてはほとんど分布が付かないことから、10°C 下げることによって照射温度は同じに対応できるため、照射温度制御範囲内であることがわかる。

4. まとめ

以上の検討の結果、得られた結論は以下のとおりである。

- (1) CT 試験片のキャプセル装荷サブプログラムにより求めた A533B 材の 1 インチ CT 試験片のガンマ発熱率 0.74W/g (鉄相当) の解析結果では、矩形の試料形状でも CT 試験片形状でもほとんど照射温度は変化しない。また、矩形形状と比べて CT 試験体形状は、最高温度はほとんど差がないが、CT 試験片のつかみ部、き裂導入部上部の隙間にスペーサを入れて、ガンマ発熱量を同一に近づけても温度分布を生じる。さらに、スペーサの有り無しでスペーサ部分の温度が若干変化するが、き裂評価部分にはほとんど影響を与えないことがわかった。なお、き裂先端部に最大熱応力が発生するが、その応力値は約 2kg/mm² と十分許容できる範囲である。
- (2) 2 分割熱媒体のキャプセル装荷サブプログラムにより求めたハフニウム材の照射試料のガンマ発熱率約 7W/g (鉄相当) の解析結果では、2 分割のそれぞれの熱媒体間で約 8°C の温度差が生じるが、1 体ものの熱媒体の照射温度と比べてもほとんど同じ温度となり、照射試料としては問題ないことを明らかにした。また、2 分割熱媒体が何らかの原因で隙間が 0.1mm から 0.15mm に広がった場合、照射温度は約 10°C 程度上昇するが、この温度変化は十分温度制御範囲内であ

り照射試験には問題ないことがわかった。

以上の解析評価から、照射試験に特に問題ないことが示されたが、照射試験片形状、材質、発熱量等の照射条件が異なる場合には、この CT 試験片のキャプセル装荷及び 2 分割熱媒体のキャプセル装荷のサブプログラムを使用して解析評価を行う必要がある。

謝 辞

今回、本報告書をまとめるにあたっては、河村弘 照射試験炉センター長、新見素二 原子炉施設管理部長から有意義な助言、指導を戴きました。特定課題推進員の飛田正浩氏及び株式会社ミクロコスモスの秋本敬史氏に有限要素法「NISA」コードの取扱い等のご指導及び北島敏雄原子炉施設管理部照射設備整備課長に御指導いただきました。また、原子炉施設管理部照射設備整備課の皆様には、ご協力頂きました。ここに関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 飛田 正浩、他：JAERI-Tech 2003-042, “照射キャプセル設計支援のための 3 次元温度計算用サブプログラムの開発” (2003)
- 2) M. TOBITA, Y. MATSUI : “Development of 3 -dimensional Capsule Temperature Calculation Program using FEM (NISA Code)”, Proceedings of 2002 KAERI-JAERI Joint Seminar on Irradiation Technology, P.87-95, (2002)

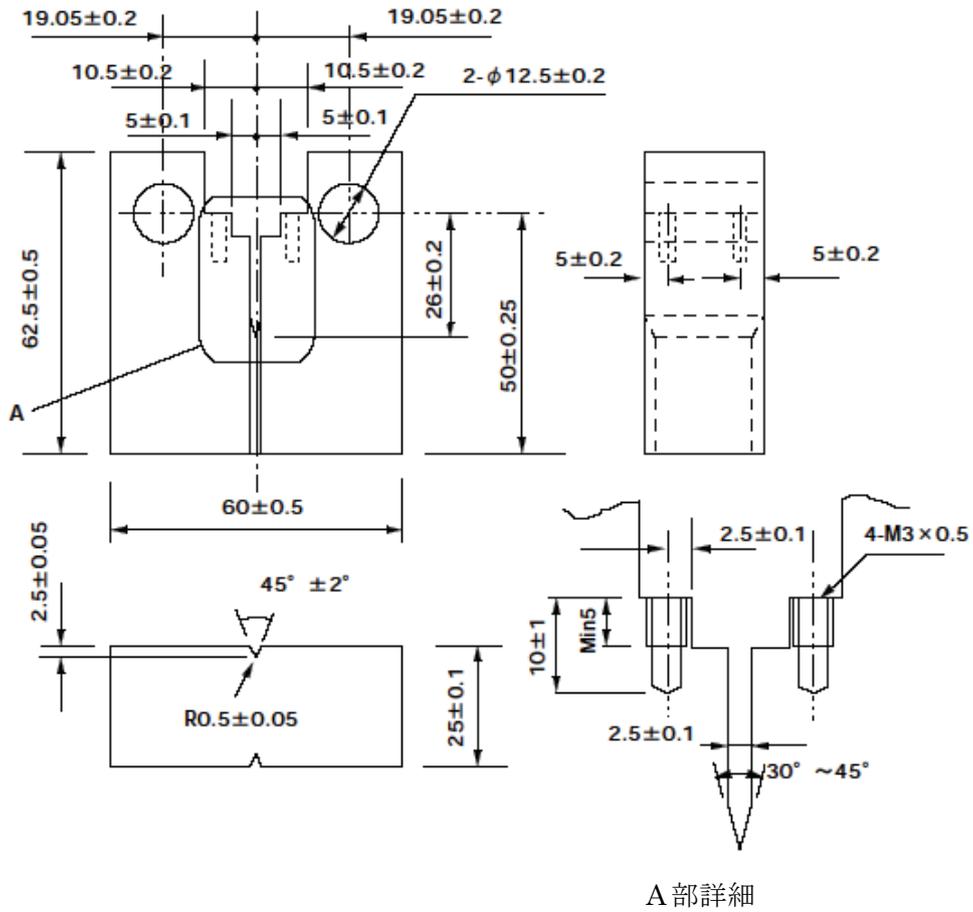


Fig1-1 CT 試験片

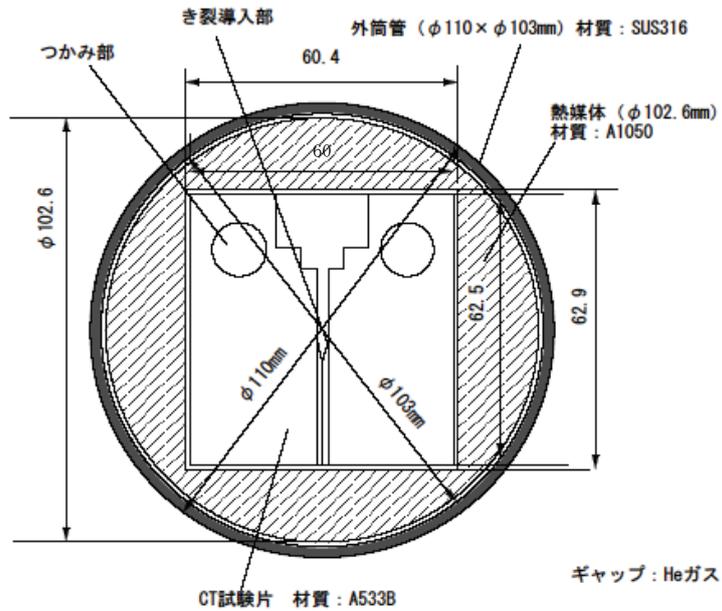


Fig2-1 1インチサイズの CT 試験片のキャプセル断面図

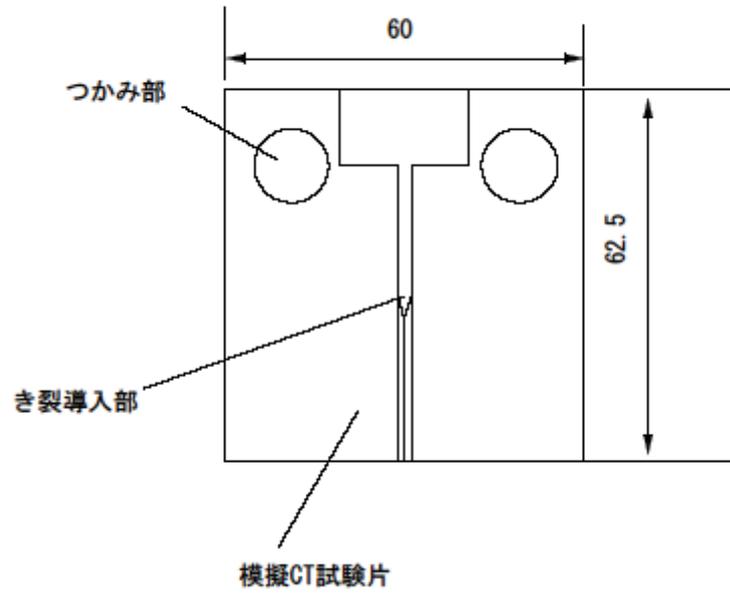
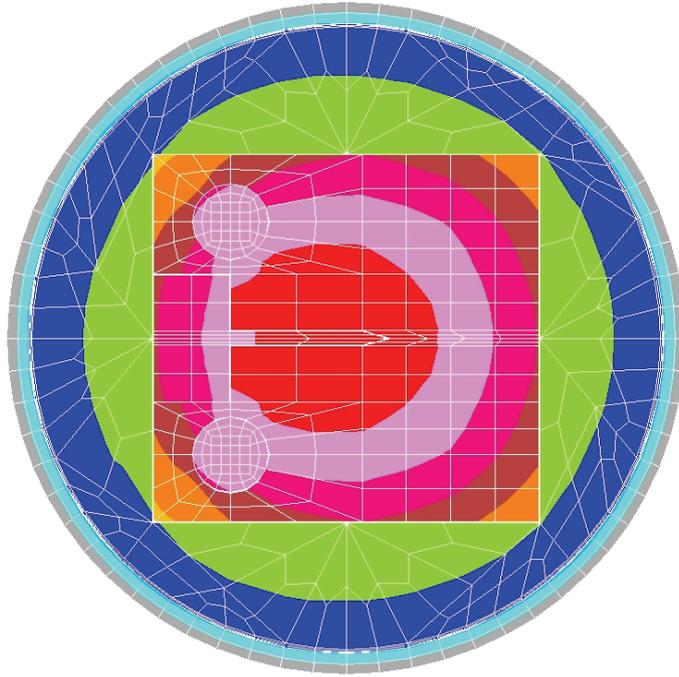


Fig2-2 1インチサイズの模擬 CT 試験片

This is a blank page.

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM (15.0.0) PRE/POST MODULE



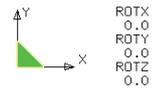
TEMPERATURE

VIEW : 54.1276
RANGE: 195.7124



CRANES SOFTWARE, INC., - DISF

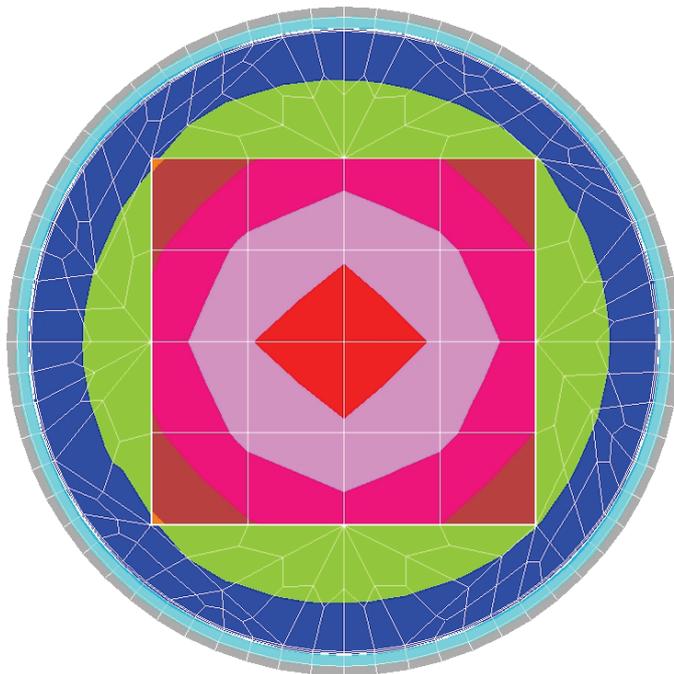
MAR/19/08 11:01:53



NISA

Fig2-3 1 インチサイズ模擬 CT 試験片の温度分布 (片ギャップ 0.1mm)

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM (15.0.0) PRE/POST MODULE



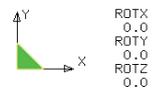
TEMPERATURE

VIEW : 54.12865
RANGE: 192.712



CRANES SOFTWARE, INC., - DISF

MAR/19/08 15:55:37

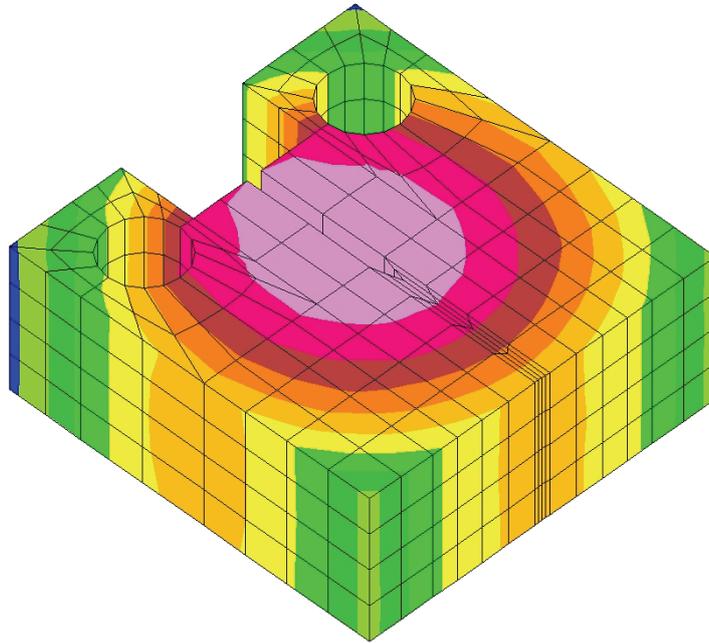


NISA

Fig2-4 矩形模擬 CT 試験片の温度分布

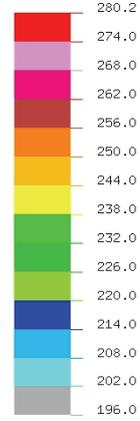
This is a blank page.

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM (15.0.0) PRE/POST MODULE



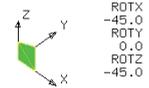
TEMPERATURE

VIEW : 217.7637
RANGE : 274.3643



CRANES SOFTWARE, INC., - DIS

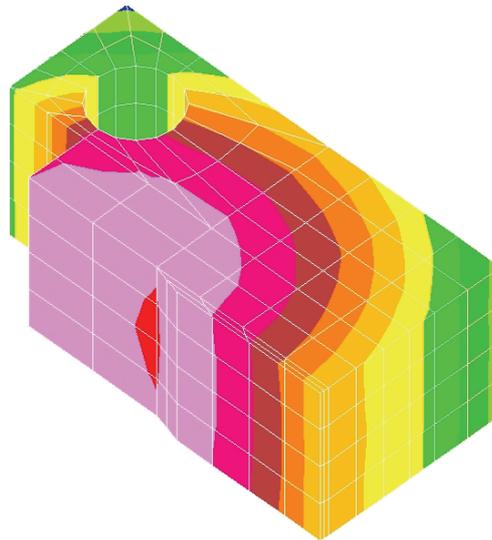
MAR/19/08 11:46:25



NISA

Fig2-5a 1 インチサイズ模擬 CT 試験片の温度分布
(片ギャップ 0.2mm、スペーサ有り)

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM (15.0.0) PRE/POST MODULE



TEMPERATURE

VIEW : 218.1613
RANGE : 274.3643



CRANES SOFTWARE, INC., - DIS

MAR/19/08 11:47:51

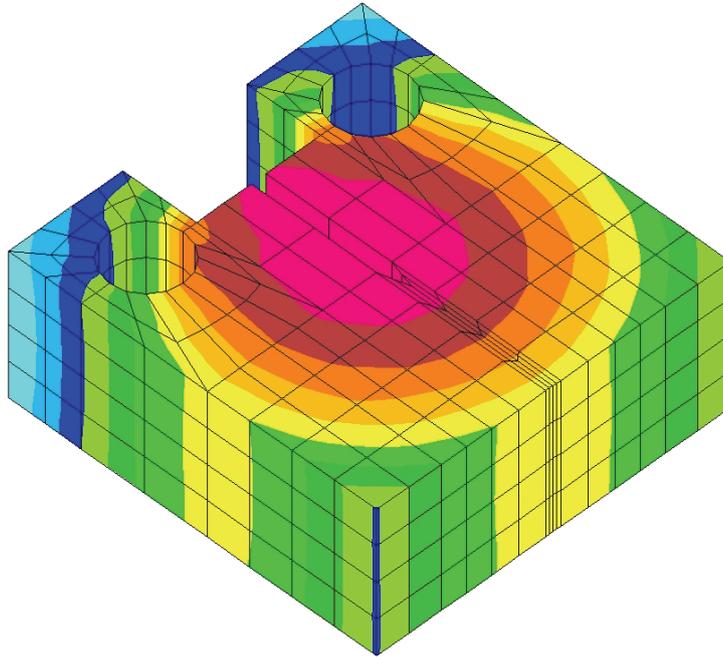


NISA

Fig2-5b 1 インチサイズ模擬 CT 試験片の温度分布断面
(片ギャップ 0.2mm、スペーサ有り)

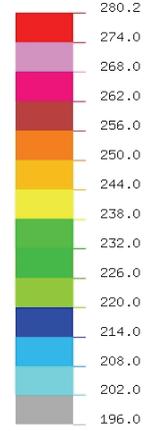
This is a blank page.

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM (15.0.0) PRE/POST MODULE



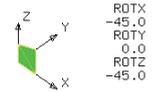
TEMPERATURE

VIEW : 202.8868
RANGE : 266.6981



CRANES SOFTWARE, INC., - DIS

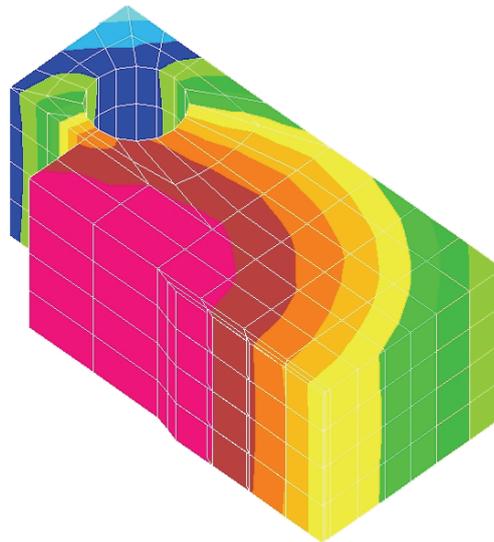
MAR/19/08 11:43:38



NISA

Fig2-6a 1インチサイズ模擬 CT 試験片の温度分布 (スペーサなし)

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM (15.0.0) PRE/POST MODULE



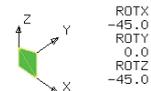
TEMPERATURE

VIEW : 203.9734
RANGE : 266.6981



CRANES SOFTWARE, INC., - DIS

MAR/19/08 11:44:33

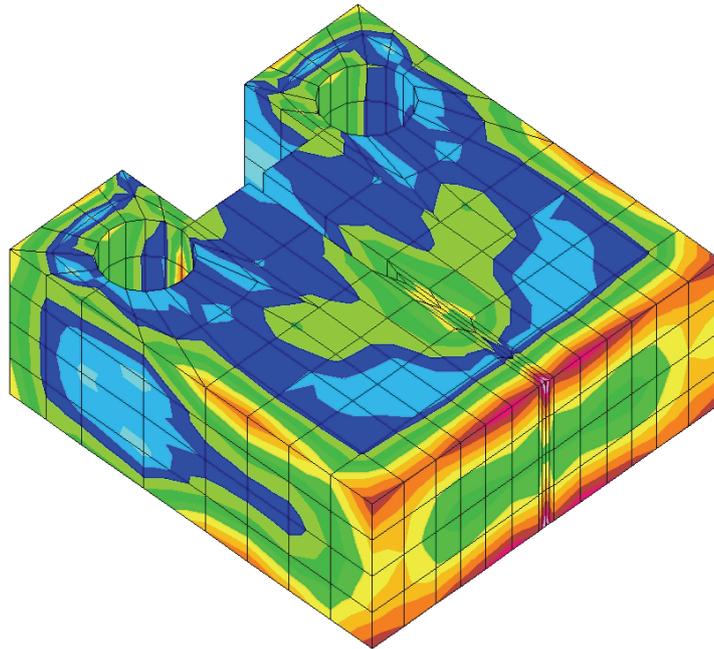


NISA

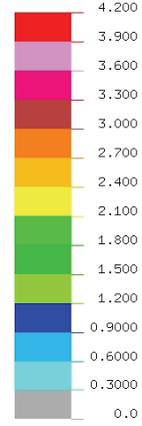
Fig2-6b 1インチサイズ模擬 CT 試験片の温度分布断面 (スペーサなし)

This is a blank page.

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM (15.0.0) PRE/POST MODULE

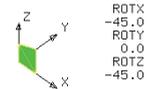


VON-MISES STRESS
VIEW : 0.3845064
RANGE : 4.131863



CRANES SOFTWARE, INC., - DISF

MAR/19/08 13:34:00

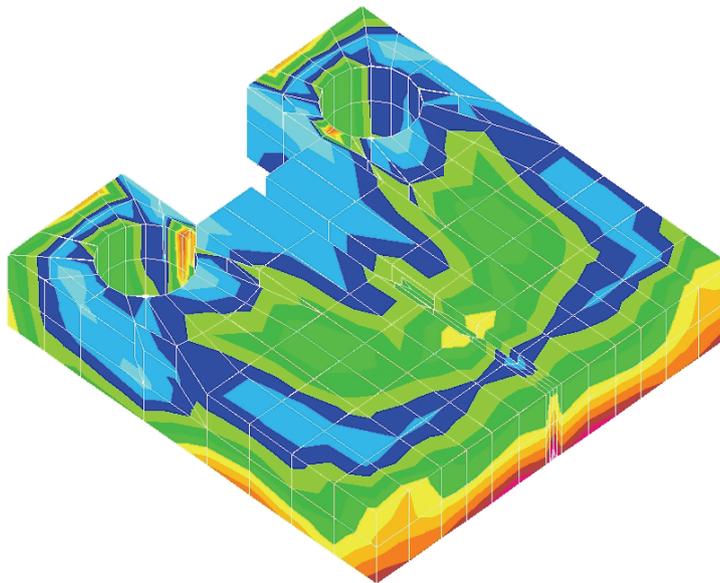


ROTX
-45.0
ROTY
0.0
ROTZ
-45.0

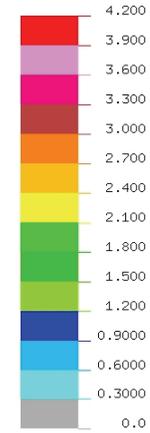
NISA

Fig2-7a 1インチサイズ模擬 CT 試験片の応力分布
(片ギャップ 0.2mm、スペーサ有り)

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM (15.0.0) PRE/POST MODULE

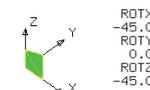


VON-MISES STRESS
VIEW : 0.2423198
RANGE : 4.122313



CRANES SOFTWARE, INC., - DISF

MAR/19/08 13:35:43



ROTX
-45.0
ROTY
0.0
ROTZ
-45.0

NISA

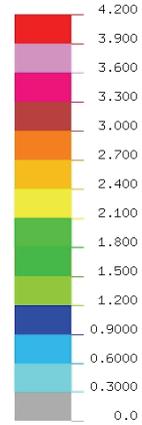
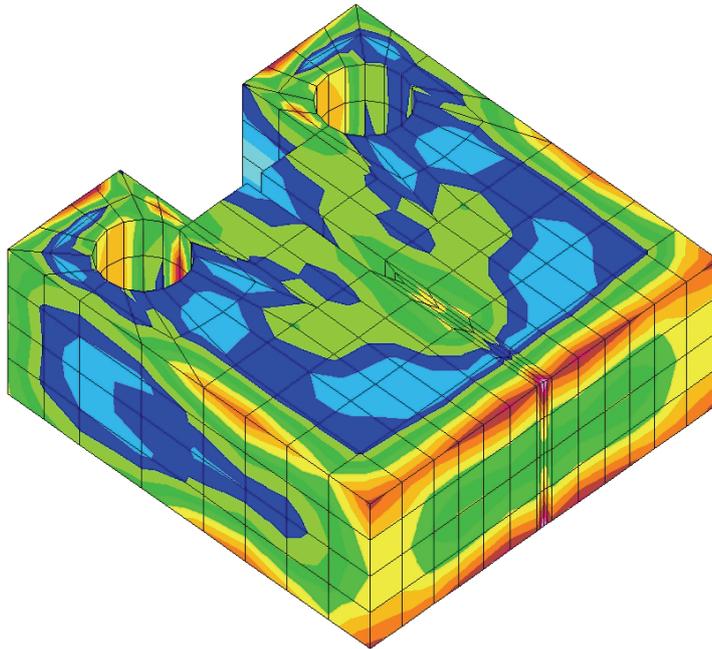
Fig2-7b 1インチサイズ模擬 CT 試験片の応力分布断面
(片ギャップ 0.2mm、スペーサ有り)

This is a blank page.

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM (15.0.0) PRE/POST MODULE

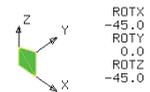
VON-MISES STRESS

VIEW : 0.2917866
RANGE : 4.017072



CRANES SOFTWARE, INC., - DISF

MAR/19/08 13:37:54



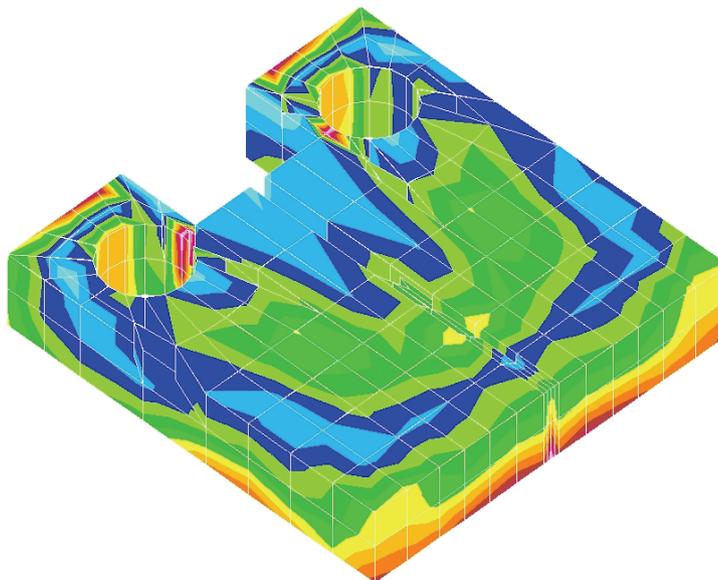
NISA

Fig2-8a 1インチサイズ模擬 CT 試験片の応力分布
(片ギャップ 0.2mm、スペーサ無し)

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM (15.0.0) PRE/POST MODULE

VON-MISES STRESS

VIEW : 0.3317343
RANGE : 4.007946



CRANES SOFTWARE, INC., - DISF

MAR/19/08 13:38:48



NISA

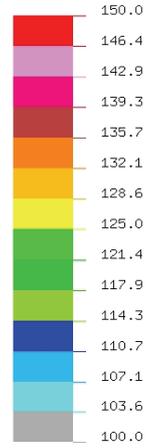
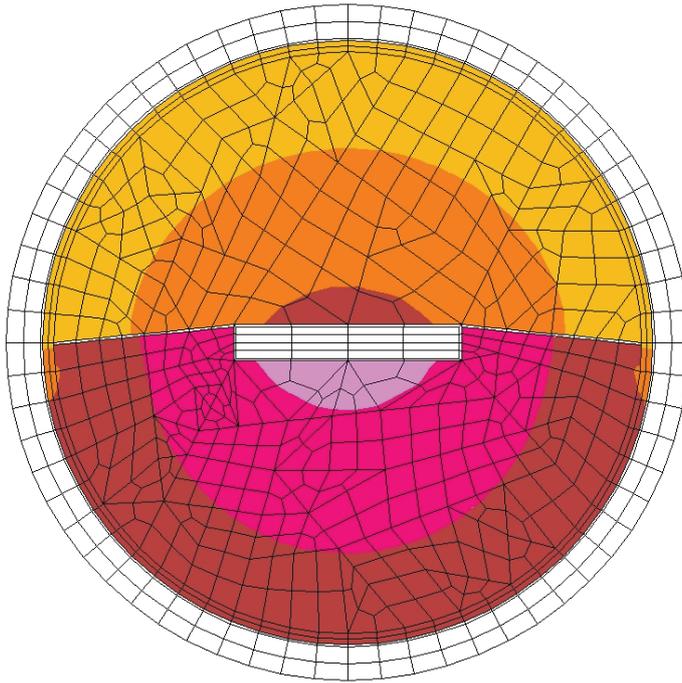
Fig2-8b 1インチサイズ模擬 CT 試験片の応力分布断面
(片ギャップ 0.2mm、スペーサ無し)

This is a blank page.

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM (15.0.0) PRE/POST MODULE

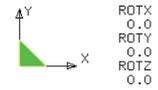
TEMPERATURE

VIEW : 58.84963
RANGE : 220.403



CRANES SOFTWARE, INC., - DISI

MAR/19/08 10:28:36



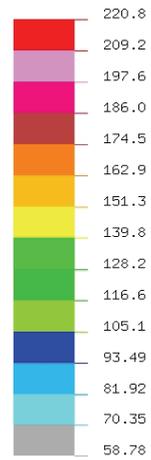
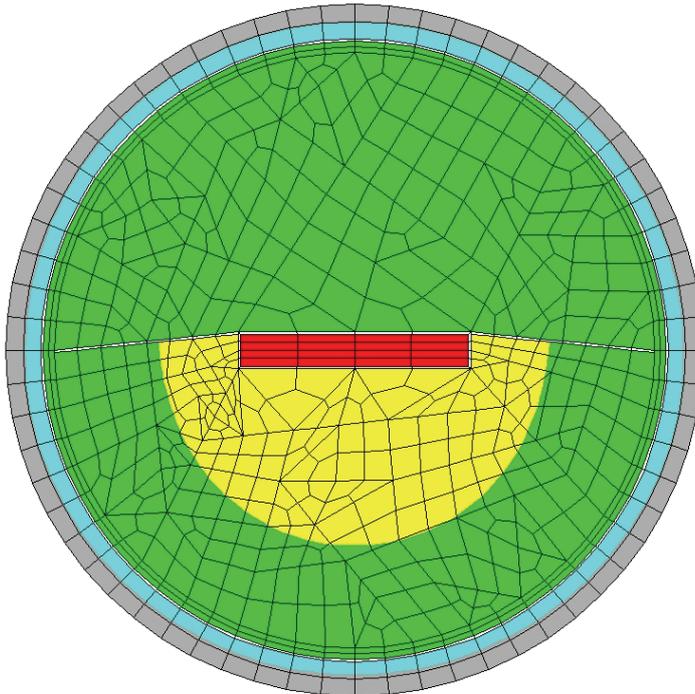
NISA

Fig3-1 2分割熱媒体の温度

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM (15.0.0) PRE/POST MODULE

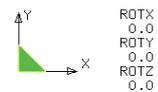
TEMPERATURE

VIEW : 58.84963
RANGE : 220.403



CRANES SOFTWARE, INC., - DISI

MAR/19/08 10:23:27

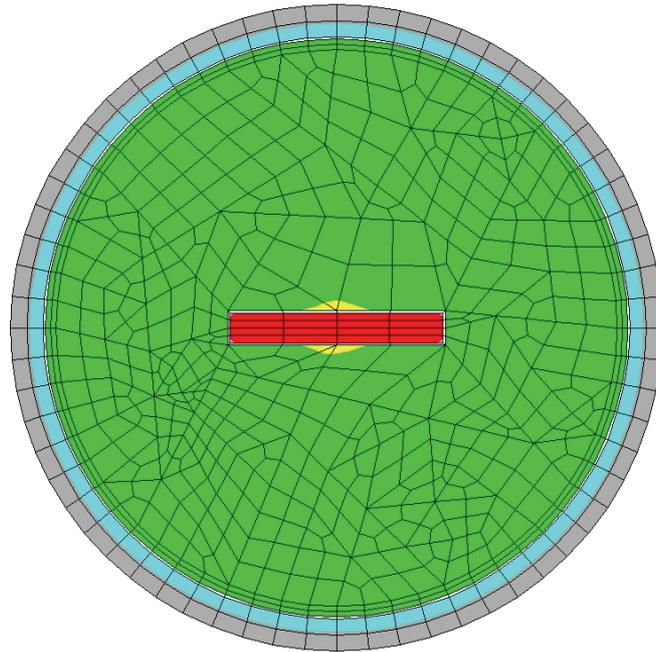


NISA

Fig3-2 2分割熱媒体の照射温度

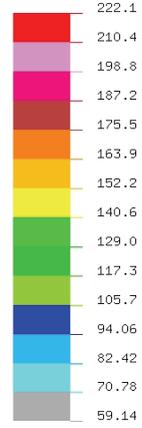
This is a blank page.

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM (15.0.0) PRE/POST MODULE



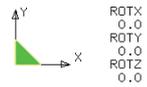
TEMPERATURE

VIEW : 59.21139
RANGE : 221.7208



CRANES SOFTWARE, INC., - DISI

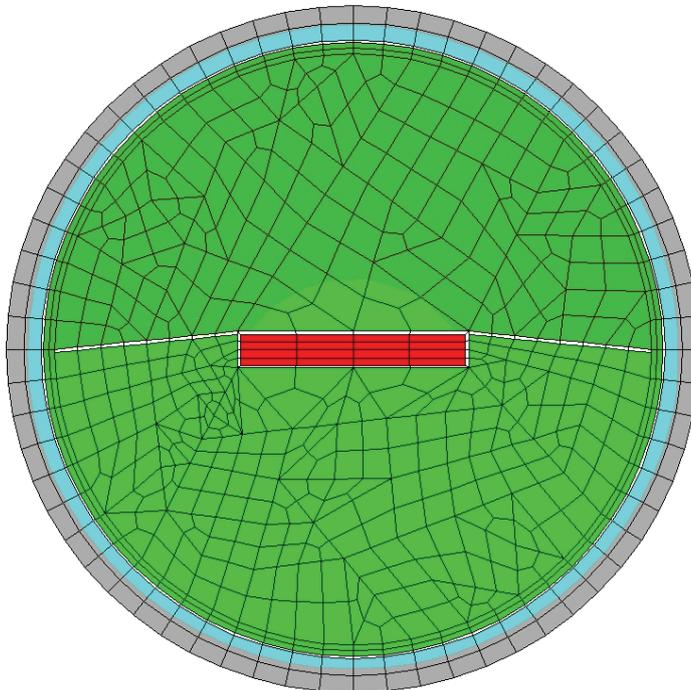
MAR/19/08 10:42:29



NISA

Fig3-3 1 体型熱媒体の照射温度

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM (15.0.0) PRE/POST MODULE



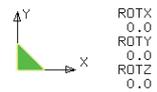
TEMPERATURE

VIEW : 58.69109
RANGE : 232.7991



CRANES SOFTWARE, INC., - DISI

MAR/19/08 10:38:28



NISA

Fig3-4 2 分割熱媒体の照射温度(片ギャップ 0.15mm)

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

| 基本量 | SI 基本単位 | |
|-------|---------|-----|
| | 名称 | 記号 |
| 長さ | メートル | m |
| 質量 | キログラム | kg |
| 時間 | 秒 | s |
| 電流 | アンペア | A |
| 熱力学温度 | ケルビン | K |
| 物質質量 | 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 | 毎メートル | m ⁻¹ |
| 密度 (質量密度) | キログラム毎立方メートル | kg/m ³ |
| 質量体積 (比体積) | 立方メートル毎キログラム | m ³ /kg |
| 電流密度 | アンペア毎平方メートル | A/m ² |
| 電界の強さ | アンペア毎メートル | A/m |
| (物質質量の)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 ²⁴ | ヨタ | Y | 10 ⁻¹ | デシ | d |
| 10 ²¹ | ゼタ | Z | 10 ⁻² | センチ | c |
| 10 ¹⁸ | エクサ | E | 10 ⁻³ | ミリ | m |
| 10 ¹⁵ | ペタ | P | 10 ⁻⁶ | マイクロ | μ |
| 10 ¹² | テラ | T | 10 ⁻⁹ | ナノ | n |
| 10 ⁹ | ギガ | G | 10 ⁻¹² | ピコ | p |
| 10 ⁶ | メガ | M | 10 ⁻¹⁵ | フェムト | f |
| 10 ³ | キロ | k | 10 ⁻¹⁸ | アト | a |
| 10 ² | ヘクト | h | 10 ⁻²¹ | ゼプト | z |
| 10 ¹ | デカ | da | 10 ⁻²⁴ | ヨクト | y |

表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 | SI基本単位による表し方 |
| 平面角 | ラジアン ^(a) | rad | | m・m ⁻¹ =1 ^(b) |
| 立体角 | ステラジアン ^(a) | sr ^(c) | | m ² ・m ⁻² =1 ^(b) |
| 周波数 | ヘルツ | Hz | | s ⁻¹ |
| 力 | ニュートン | N | | m・kg・s ⁻² |
| 圧力, 応力 | パスカル | Pa | N/m ² | m ⁻¹ ・kg・s ⁻² |
| エネルギー, 仕事, 熱量 | ジュール | J | N・m | m ² ・kg・s ⁻² |
| 工率, 放射束 | ワット | W | J/s | m ² ・kg・s ⁻³ |
| 電荷, 電気量 | クーロン | C | | s・A |
| 電位差 (電圧), 起電力 | ボルト | V | W/A | m ² ・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹ |
| 静電容量 | ファラド | F | C/V | m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ² |
| 電気抵抗 | オーム | Ω | V/A | m ² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ⁻² |
| コンダクタンス | ジーメン | S | A/V | m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ² |
| 磁束 | ウェーバ | Wb | V・s | m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹ |
| 磁束密度 | テスラ | T | Wb/m ² | kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹ |
| インダクタンス | ヘンリー | H | Wb/A | m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻² |
| セルシウス温度 | セルシウス度 ^(d) | °C | | K |
| 光強度 | ルーメン | lm | cd・sr ^(c) | m ² ・m ⁻² ・cd=cd |
| 照射 (放射核種の)放射能 | ルクス | lx | lm/m ² | m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd |
| 吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量 | グレイ | Gy | J/kg | s ⁻¹ |
| | シーベルト | Sv | J/kg | m ² ・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った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。組立単位を形作る際のいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する際には記号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接頭語を併せて用いても良い。

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 |
| 粘力のモーメント | パスカル秒 | Pa・s | m ⁻¹ ・kg・s ⁻¹ |
| 表面張力 | ニュートンメートル | N・m | m ² ・kg・s ⁻² |
| 角速度 | ニュートン毎メートル | N/m | kg・s ⁻² |
| 角加速度 | ラジアン毎秒 | rad/s | m・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹ |
| 熱流密度, 放射照度 | ラジアン毎平方秒 | rad/s ² | m・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻² |
| 熱容量, エントロピー | ワット毎平方メートル | W/m ² | kg・s ⁻³ |
| 質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー | ジュール毎ケルビン | J/K | m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ |
| 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・K) | m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹ |
| 熱伝導率 | ジュール毎立方メートル | J/m ³ | m ⁻¹ ・kg・s ⁻² |
| 体積エネルギー | ワット毎メートル毎ケルビン | W/(m・K) | m・kg・s ⁻³ ・K ⁻¹ |
| 電界の強さ | ジュール毎立方メートル | J/m ³ | m ⁻¹ ・kg・s ⁻² |
| 体積電荷 | ボルト毎メートル | V/m | m・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹ |
| 電気変位 | クーロン毎立方メートル | C/m ³ | m ⁻³ ・s・A |
| 誘電率 | クーロン毎平方メートル | C/m ² | m ⁻² ・s・A |
| 透磁率 | ファラド毎メートル | F/m | m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ² |
| モルエネルギー | ヘンリー毎メートル | H/m | m・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻² |
| モルエントロピー | ジュール毎モル | J/mol | m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹ |
| モル熱容量 | ジュール毎モル毎ケルビン | J/(mol・K) | m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹ |
| 照射線量 (X線及びγ線) | ジュール毎キログラム | J/kg | m ² ・s ⁻² |
| 吸収線量 | グレイ毎秒 | Gy/s | kg ⁻¹ ・s ⁻³ |
| 放射強度 | ワット毎ステラジアン | W/sr | m ² ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ |
| 放射輝度 | ワット毎平方メートル毎ステラジアン | W/(m ² ・sr) | m ² ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =kg ⁻¹ ・s ⁻³ |

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°=(π/180) rad |
| 分 | ' | 1'=(1/60)°=(π/10800) rad |
| 秒 | " | 1"=(1/60)'=(π/648000) rad |
| リットル | l, L | 1l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³ |
| トン | t | 1t=10 ³ kg |
| ネーパ | 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単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

| 名称 | 記号 | SI 単位であらわされる数値 |
|----------|----|--|
| 電子ボルト | eV | 1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J |
| 統一原子質量単位 | u | 1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg |
| 天文単位 | ua | 1ua=1.49597870691(30)×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 | | 1海里=1852m |
| ノット | | 1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s |
| アール | a | 1a=1 dam 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 | 1Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m |
| バイン | b | 1b=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 |
| ダイン | dyn | 1 dyn=10 ⁻⁵ N |
| ポアズ | P | 1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s |
| ストークス | St | 1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s |
| ガウス | G | 1 G ≡ 10 ⁴ T |
| エルステッド | Oe | 1 Oe ≡ (1000/4π) A/m |
| マクスウェル | Mx | 1 Mx ≡ 10 ⁻⁸ Wb |
| スチルブ | sb | 1 sb =1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ² |
| ホト | ph | 1 ph=10 ⁴ lx |
| ガリ | 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 |
|-----------|--------------|--|
| キュリー | Ci | 1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq |
| レントゲン | R | 1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg |
| ラド | rad | 1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy |
| レム | rem | 1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv |
| X線単位 | IX unit | 1 IX unit=1.002×10 ⁻⁴ nm |
| ガンマ | γ | 1γ=1 nT=10 ⁻⁹ T |
| ジャンスキー | Jy | 1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹ |
| フェルミ | f | 1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m |
| メートル系カラット | metric carat | 1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg |
| トル | Torr | 1 Torr = (101 325/760) Pa |
| 標準大気圧 | atm | 1 atm = 101 325 Pa |
| カロリ | cal | |
| マイクロン | μ | 1 μ = 1μm=10 ⁻⁶ m |

