

JAERI-Tech



JP0350390

2003-055



大強度陽子加速器計画3GeVシンクロトロン用  
入射ダンプの熱解析

2003年7月

倉持 勝也・山本 風海・金正 優計

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

## 大強度陽子加速器計画 3GeV シンクロトロン用 入射ダンプの熱解析

日本原子力研究所東海研究所大強度陽子加速器施設開発センター  
倉持 勝也\*・山本 風海・金正 倫計

(2003年4月14日受理)

大強度陽子加速器計画において、3GeV ラピッドサイクリングシンクロトロン(3GeV-RCS)用の入射ビームダンプは、黒鉛薄膜で  $H^+$  に変換できなかった  $H^-$  と  $H^0$  ビームを吸収廃棄するために設置される。ビームダンプに吸収されるパワーは、現在の設計では 1kW に達するため、ビームダンプの成立性を検討するうえで、ダンプにおける最高温度及び熱応力を評価する必要がある。そこで、MARS コードを用いて発熱分布を評価し、それを基にして ANSYS コードで温度と熱応力分布の解析評価を行った。

その結果、1kW 入射条件下で数回の運転サイクル(3週間のビーム運転と1週間のビーム停止期間を合わせて1サイクル)を繰り返した後、鉄部の中心で 370K に達するものの、ビームダンプの鉄部とトンネルのコンクリート壁との境界はコンクリートの許容耐熱温度よりも低い 320K 程度に抑制できることが分かった。また、最大ミーゼス応力(相当応力)は鉄部で 96MPa、コンクリート壁で約 0.2MPa とそれらの許容応力よりも低い値であった。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

\* 業務協力員

# Thermal Analysis of the Injection Beam Dump of 3GeV Rapid Cycling Synchrotron

Masaya KURAMOCHI\*, Kazami YAMAMOTO  
and Michikazu KINSHO

Center for Proton Accelerator Facilities  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 14, 2003)

In the High-Intensity Proton Accelerator Project, an injection beam dump of the 3GeV rapid cycling synchrotron (3GeV-RCS) is to be installed to absorb small amount of  $H^-$  and  $H^0$  beams that can not be changed into  $H^+$  beam with a graphite foil. The beam power absorbed in the dump would become up to 1 kW. From the viewpoint of feasibility of the beam dump, it is necessary to estimate the maximum temperature and thermal stress caused by the absorbed beam power. Thermal analyses were carried out to clarify the temperature and thermal stress distributions in the dump including concrete walls by using the ANSYS code, which were based on the heat deposition rates obtained with the MARS code.

Analytical results showed that the temperature at the center region made of iron reached up to 370K after several operation cycles (one cycle is three-week operation including one-week interval) under the 1kW-beam injection. Then, the temperature at the boundary between the iron region of the beam dump and the concrete wall of the tunnel was rather low temperature of about 320K, which was lower than the allowable temperature of the concrete. Also, the maximum Mises stresses of 96 MPa and about 0.2 MPa were generated in the iron region and the concrete wall respectively, which were much lower than the allowable stresses of iron and concrete.

**Keywords:** Injection Beam Dump, 3GeV Rapid Cycling Synchrotron, Thermal Analyses, Temperature Distribution, Thermal Stress Distribution

\* Cooperative Staff

## 目次

1.はじめに	1
2.発熱条件検討	3
2.1荷電変換入射	3
2.2荷電変換効率	4
2.3ダンプ入射ビーム条件	7
2.4計算体系	9
2.5発熱量	13
3.入射ビームダンプ内の温度分布解析	18
4.入射ビームダンプの熱応力解析	107
5.結言	147
謝辞	148
参考文献	148

## Contents

1. Introduction	1
2. Estimation of Heat Deposition Rates in the Injection Beam Dump	3
2.1 Conversion of Charged Particle	3
2.2 Conversion Efficiency	4
2.3 Beam Conditions Injected to the Beam Dump	7
2.4 Analytical Model	9
2.5 Heat Deposition Rates in the Beam Dump	13
3. Analytical Results of Temperature Distributions in the Beam Dump	18
4. Analytical Results of Thermal-stress Distributions in the Beam Dump	107
5. Concluding Remarks	147
Acknowledgement	148
References	148

This is a blank page.

## 1. はじめに

大強度陽子加速器施設建設計画 (J-PARC Project) は、日本原子力研究所と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が共同で建設を行う、高エネルギー、大強度の陽子加速器施設である [1]。施設は、日本原子力研究所・東海研究所の南側敷地内の南北約 1,400 m、東西約 500 m の範囲に配置され、加速エネルギー 400 MeV の直線加速装置(400MeV リニアック)、3GeV ラピッドサイクリングシンクロトロン(3GeV-RCS)、50GeV メインリング(50GeV-MR) の 3 種類の加速器と、加速された陽子ビームを利用する各実験施設から構成される。各実験施設では、各加速器より供給される大強度陽子ビームを用いて、生命・物質科学、核変換、素粒子・原子核物理等の広範な研究を行う予定である。加速器の中でも 3GeV-RCS は、最大 1MW の陽子ビームを加速・蓄積し、実験施設の中核となる生命・物質科学実験施設と素粒子・原子核物理等の研究のための 50GeV-MR に供給することを要求されている [2]。

この 3GeV-RCS は、線形加速器で加速された  $H^-$  ビームを炭素製の荷電変換薄膜により  $H^+$  (陽子) ビームに変換し、この陽子ビームを 25Hz の早い繰り返し周波数でさらに 3 GeV まで加速した後、物質・生命科学実験施設及び 50GeV-MR へ出射する施設である。3GeV-RCS 施設は、陽子を周回させるための電磁石、陽子ビームを 400 MeV から 3 GeV まで加速するための高周波加速空腔、陽子ビームの通り道であるセラミクス真空ダクト及び陽子ビームを入射あるいは出射するための電磁石等から成り、これらは地下約 13 m に掘られた周長約 350 m の主トンネル内に配列される。また、これら機器に電力・冷却水等を供給する共通設備及び各電源室はトンネルの内側に位置する地下 3 階—地上 1 階建ての建屋内及びその周囲に配置され、建屋各部屋からのケーブル・配管は縦口を通じて主トンネル下に掘られたサブトンネル経由で主トンネルに導かれる。

本検討書では、これら 3GeV-RCS 構成設備のうち、入射時に  $H^+$  ビームに荷電変換しきれなかった  $H^-$  ビームを吸収・廃棄するためのダンプ (入射ダンプ) の熱解析結果について報告する。この入射ダンプは、放射線遮蔽上の必要性から主トンネル壁面内に埋め込む形で設置されるため、ダンプに発生する熱的影響によっては建屋構造等に影響を及ぼす可能性がある。本報告書は以下のように構成されている。第 2 章では、熱解析を行うための計算条件として、入射ダンプ内で発生する熱量、およびその分布についての検討結果について述べ、第 3 章では、この発熱分布による入射ダンプ内の温度分布およびその時間推移について述べる。第 4 章では、この発熱によって発生する入射ダンプ内部の熱応力について説明する。

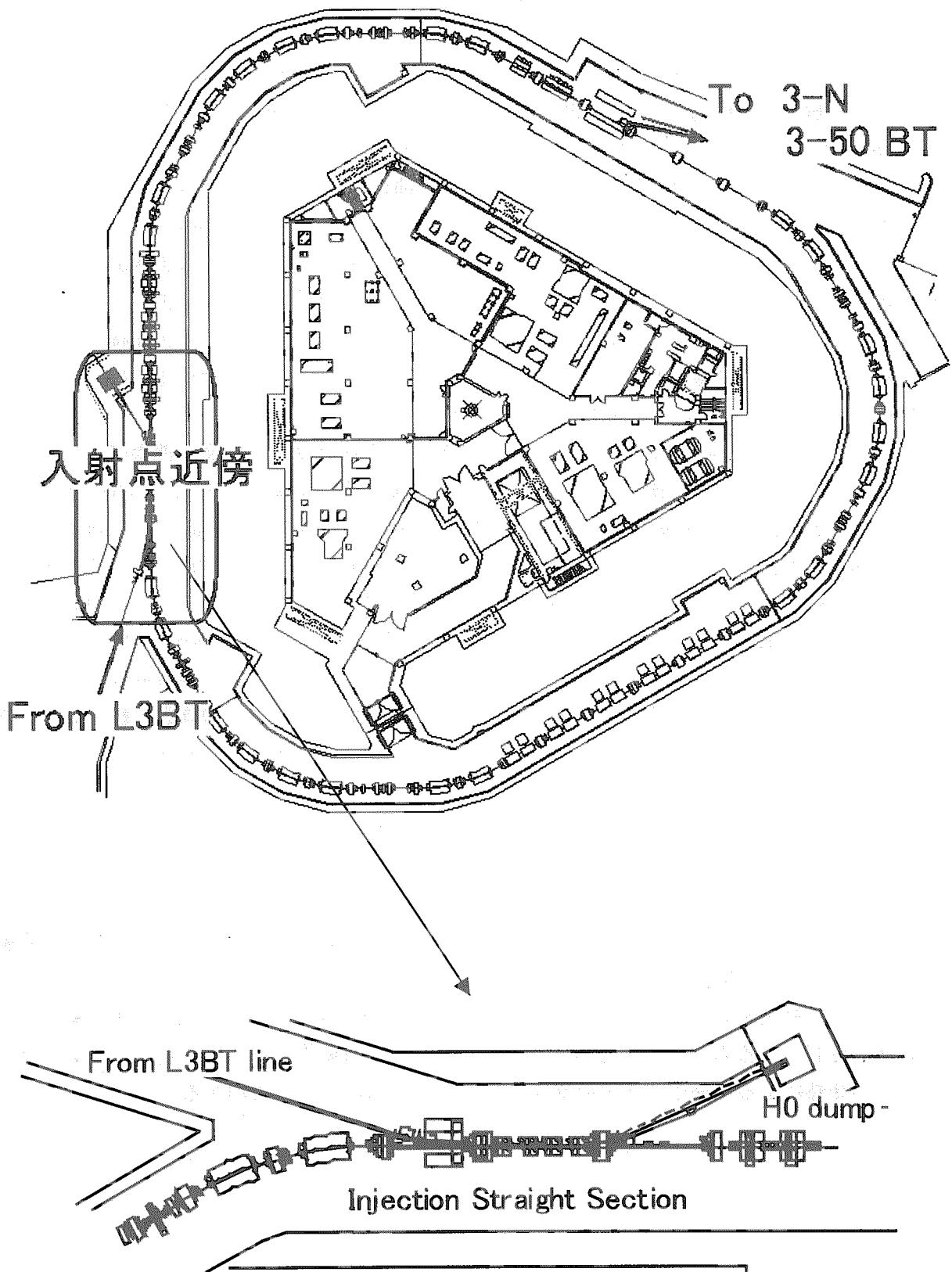


図 1.1. 入射ダンプの位置

## 2. 発熱条件検討

入射ダンプの熱設計を行うに当たって、まず入射ダンプで発生する発熱量とその分布について検討を行った。入射ダンプには、3GeV-RCS 入射時に荷電変換しきれなかった  $H^-$  および  $H^0$  ビームが定常に廃棄される。本章では、荷電変換入射方式とその効率、廃棄されるビーム量、分布等について説明する。

### 2.1. 荷電変換入射

3GeV-RCS のように、電磁石によって閉じられた周回閉軌道内に軌道外よりビームを入射しようとした場合、入射ビームと周回ビームの電荷が同じであると Liouville の定理により閉軌道内の同じ位置に重ねて同種ビームを入射することが原理的にできない。そのため、入射中に周回軌道を徐々にずらす必要があり (Multi Turn Injection)、リニアックからの入射ビームを何百ターンも重ねてシンクロトロン内に蓄積しようとすると、ずらした軌道全てを問題無く周回させるためには非常に大きなアーチャ (真空容器内径) が必要となる。そこで、効率よくビームを重ねて入射する必要がある際には荷電変換入射方式が用いられる [3][4]。荷電変換入射方式とは、リニアックからの入射ビームを  $H^-$  とし、ビームの入射点に荷電変換フォイルと呼ばれる黒鉛薄膜 (フォイル) を置くことで、入射ビームがそれを通過してリング内に入る際に、フォイルを通過した入射  $H^-$  ビームがカーボン原子との相互作用によって電子を 2 つ剥ぎ取られて、 $H^+$  としてリング内に入射される方式である。このとき、入射点において入射粒子の電荷が反転することによって、 $H^+$  粒子の閉軌道の外側から、軌道を歪めることなく粒子を  $H^+$  粒子閉軌道内に入射することができる。この方式を採用する事で、リングの閉軌道内の同じ位置に重ねて入射することが可能となる。

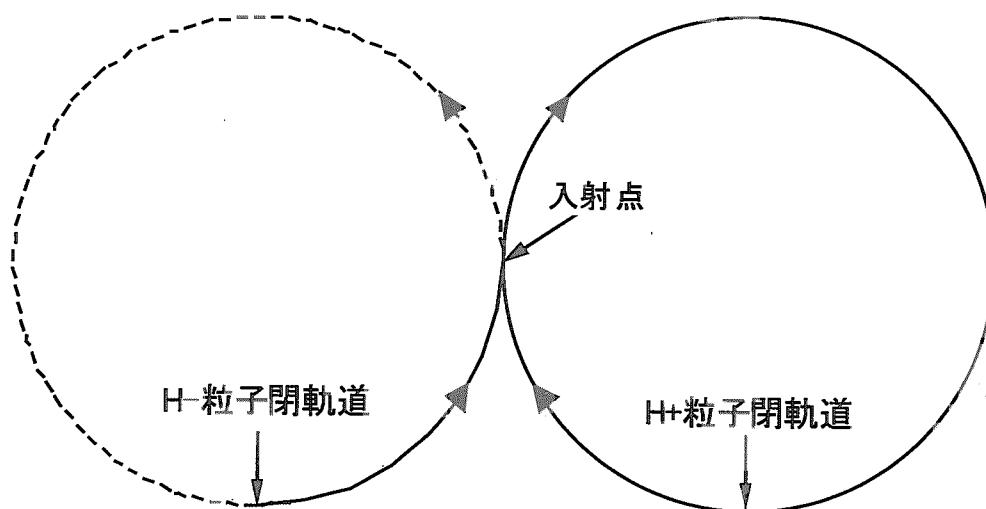


図 2.1.1 Liouville の定理 概念図

## 2. 2. 荷電変換効率

$H^-$ イオンビームが物質中を通過する時に起こる荷電変換反応には、次のような6種類が考えられる。反応前後の電荷を(i, j)とすると、電子を失う反応(-1, 0)、(-1, 1)、(0, 1)と、電子を捕獲する反応(1, 0)、(1, -1)、(0, -1)である。 $H^-$ イオンビームのエネルギーが100keV以上になると、電子捕獲反応の断面積は非常に小さくなり無視できる。従って、 $H^-$ イオンビームが物質中を通過した後のビーム中の $H^-$ 、 $H^0$ 、 $H^+$ の割合を $n^-$ 、 $n^0$ 、 $n^+$ とし、物質中の通過距離を単位面積当たりの原子数 $x$ で表せば、次の3つの微分方程式が得られる。

$$\begin{aligned} dn^-/dx &= -(\sigma_{-1,0} + \sigma_{-1,1})n^- \\ dn^0/dx &= \sigma_{-1,0}n^- - \sigma_{0,1}n^0 \\ dn^+/dx &= \sigma_{-1,1}n^- + \sigma_{0,1}n^0 \end{aligned} \quad (2.1)$$

ここで、 $\sigma_{i,j}$ は電荷*i*から*j*に変換する反応断面積である。

初期条件として、 $x=0$ で $n^-=1$ 、 $n^0=n^+=0$ として $n^-$ 、 $n^0$ 、 $n^+$ を求める

$$\begin{aligned} n^- &= \exp [ -(\sigma_{-1,0} + \sigma_{-1,1})x ] \\ n^0 &= \sigma_{-1,0} / (\sigma_{-1,0} + \sigma_{-1,1} + \sigma_{0,1}) \cdot [\exp(-\sigma_{0,1}x) - \exp\{-(\sigma_{-1,0} + \sigma_{-1,1})x\}] \\ n^+ &= 1 - n^- - n^0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

この(2.2)式を用いて、荷電変換後の $H^-$ 、 $H^0$ 、 $H^+$ の割合を求めるためには、各荷電変換反応の断面積の値が必要である。しかしながら、必要とする $H^-$ ビームエネルギー400MeVでの断面積測定実験は世界的に行われていないため、幾つかのエネルギーでの実験データを基に見積もることとした[5][6][7]。

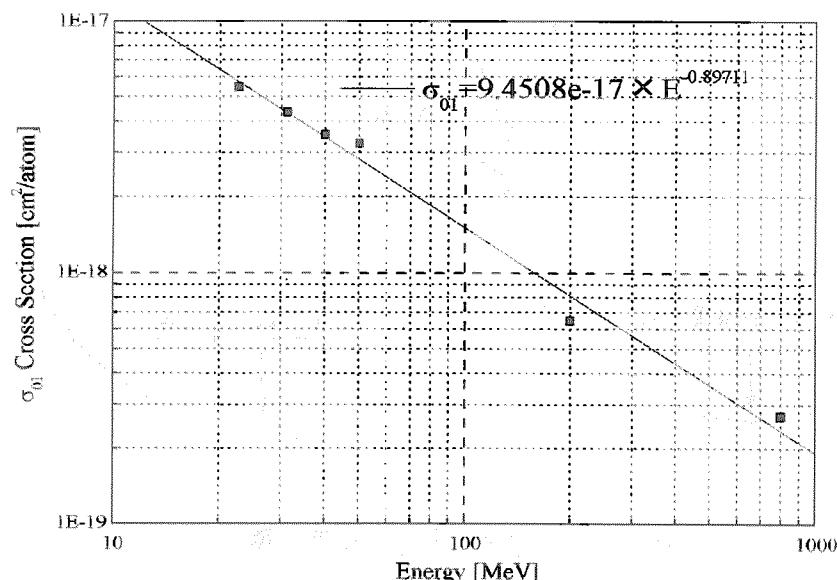


図 2.2.1  $H^0 \rightarrow H^+$ の反応断面積のビームエネルギー依存性

図 2.2.1 に  $\sigma_{01}$  すなわち  $H^0 \rightarrow H^+$  の反応断面積とビームエネルギーの関係を示す。グラフ横軸はビームエネルギー、縦軸は反応断面積  $\sigma_{01}$  の値である。既存のデータは次式でよく整理することができる。

$$\sigma_{01} = 9.4508 \times 10^{-17} \times E^{-0.89711} \quad (2.3)$$

上式より、400MeVにおける反応断面は、 $4.377 \times 10^{-19}$  ( $\text{cm}^2/\text{atom}$ ) である。

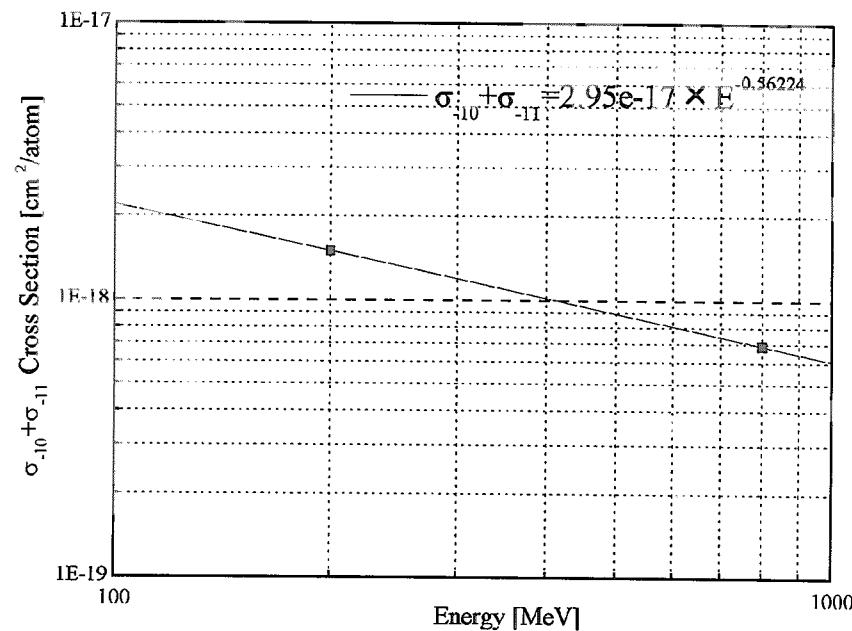


図 2.2.2  $H^- \rightarrow H^0$  および  $H^+$  となる反応断面積のビームエネルギー依存性

図 2.2.2 に  $\sigma_{-10} + \sigma_{-11}$  すなわち  $H^- \rightarrow H^0$  および  $H^+$  となる反応断面積とビームエネルギーの関係を示す。グラフ横軸はビームエネルギー、縦軸は反応断面積  $\sigma_{-10} + \sigma_{-11}$  の値である。既存のデータは 2 点しかないが、これを  $\sigma_{01}$  と同様に整理すると下式を得た。

$$\sigma_{-10} + \sigma_{-11} = M_0 \times E^{M_1} \quad (2.4)$$

上式に当てはめると、 $M_0 = 2.95 \times 10^{-17}$ ,  $M_1 = -0.56224$  となり、400MeVでの反応断面積は  $1.016 \times 10^{-18}$  ( $\text{cm}^2/\text{atom}$ ) となる。

これらの結果より、フォイル厚さを変えたときの荷電変換効率を求めた結果を図 2.2.3 に示す。この図の横軸はフォイルの厚さ ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )、縦軸はその厚さのフォイル通過後の  $H^-$ ,  $H^0$ ,  $H^+$  それぞれの存在比率を示している。図 2.2.2 に見られるように、現在想定している、 $290 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  の厚さでは、入射  $H^-$  ビームの 99.7% は  $H^+$  に荷電変換されることが分かる。

This is a blank page.

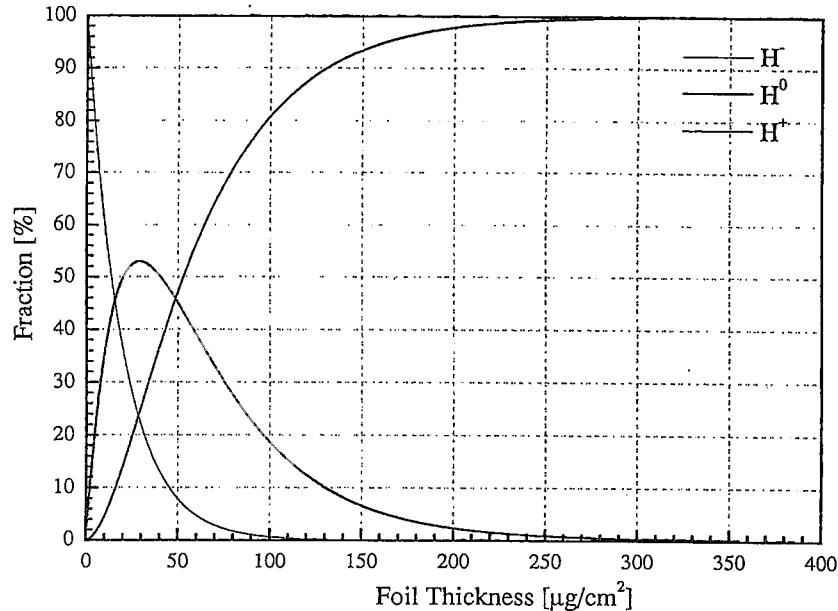


図 2.2.3 荷電変換効率

### 2.3. ダンプ入射ビーム条件

入射ビームダンプでは、3GeV-RCS に入射する際に荷電変換フォイルで  $H^+$  ビームに変換しきれなかった  $H^0$  および  $H^-$  ビームが定的に廃棄される。その量は、上述の検討より入射ビームの 0.3% 程度と推測される。入射ビームパワーは 400MeV 入射時には 133kW であるので、廃棄される  $H^0$ 、 $H^-$  ビームはおよそ 400W となる。現在の入射ダンプの設計はこの値に対して 50% の余裕を見て 1kW のビームが定的に廃棄されるものとしている。具体的には、400MeV、1kW のビーム中には  $1.56 \times 10^{13}$  個の陽子が存在することになる。

3GeV-RCS 入射時には、移送空間内での密度を一定とし空間電荷効果の影響を緩和するため、入射ビームは水平および垂直方向に入射ビームに対して入射位置・角度を変えながら入射される（ペインティング入射）。水平方向には周回ビームを変位方向にずらすことによってペインティングを行うため、入射点および入射ダンプ輸送ライン中の入射ビームの水平方向のサイズは入射中一定であるが、垂直方向に関しては入射点で入射ビームに角度方向の変位を与えることによってペインティングを行っているため、入射蓄積中入射ビームダンプの位置ではビーム入射位置が垂直方向に変位していく。このことを考慮に入れて、入射ビーム形状は縦長のビームを想定している。図 2.3.1 に入射ビームダンプ位置での入射陽子ビームの粒子分布を示す。図に見られるように入射陽子ビームは水平方向 (X) に  $\pm 4 \text{ cm}$ 、垂直方向に  $\pm 14 \text{ cm}$  の範囲に分布する。

This is a blank page.

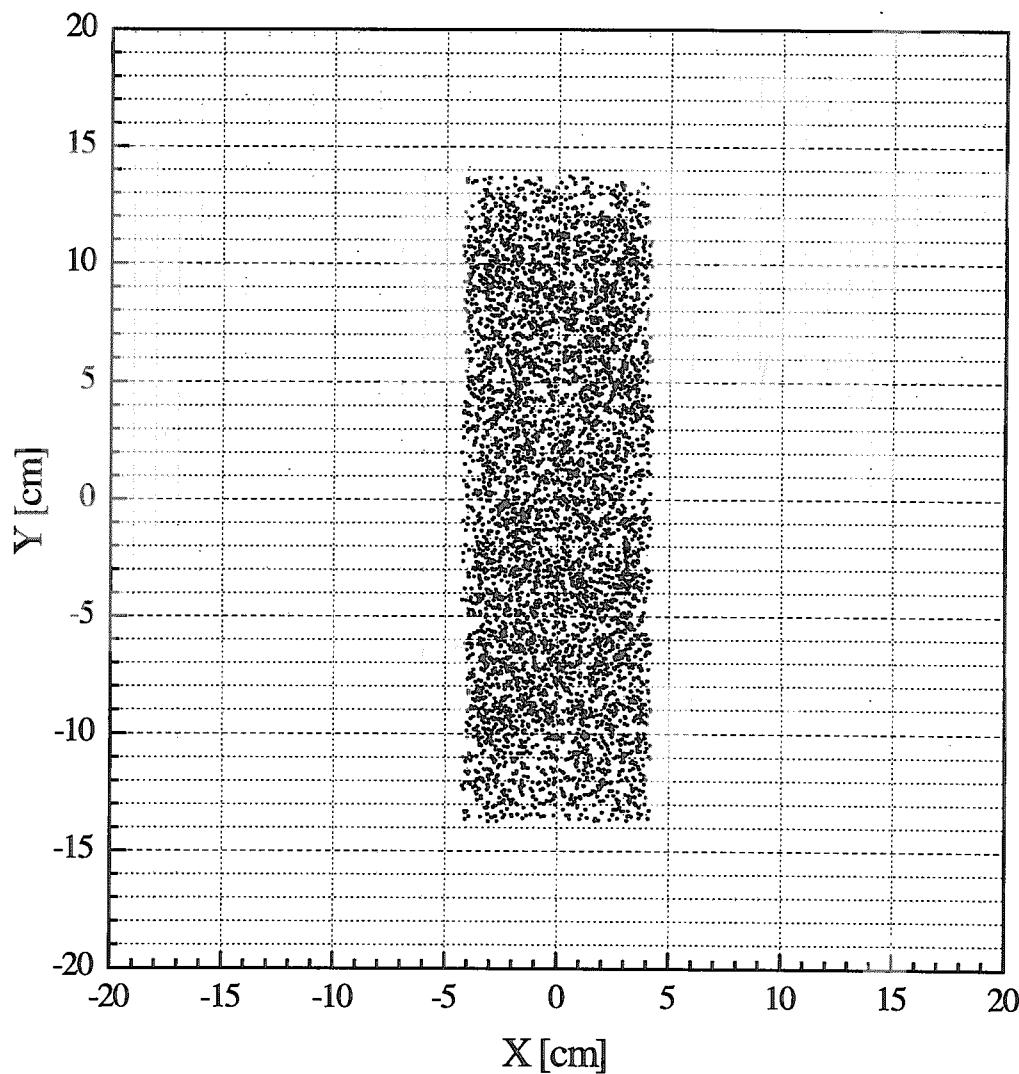


図 2.3.1 入射ダンプへの入射ビーム分布

## 2.4. 計算体系

2.3 章で述べたように 1kW のビームが定常的に吸収・廃棄されることで、ダンプ内にどのように熱が発生するかを、MARS コードを用いて計算した[8]。図 2.4.1 に計算に使用した入射ダンプの構造を示す。この入射ダンプの構造は、放射線遮蔽上必要な遮蔽厚さから決定されている。必要遮蔽厚さは、NMTC-JAM および MARS を用いて確認した。図 2.4.2 に、MARS で作成した計算体系（解析メッシュ図）を示す。MARS の計算では、ダンプ中心軸に対して軸対称に計算体系を組んでいる。また、発熱量がとくに大きいと考えられるビーム入射部付近については解析メッシュを細かくし、ビーム入射部から離れた領域についてはメッシュサイズを大きくした。解析に用いた総メッシュ数は 154 である。

This is a blank page.

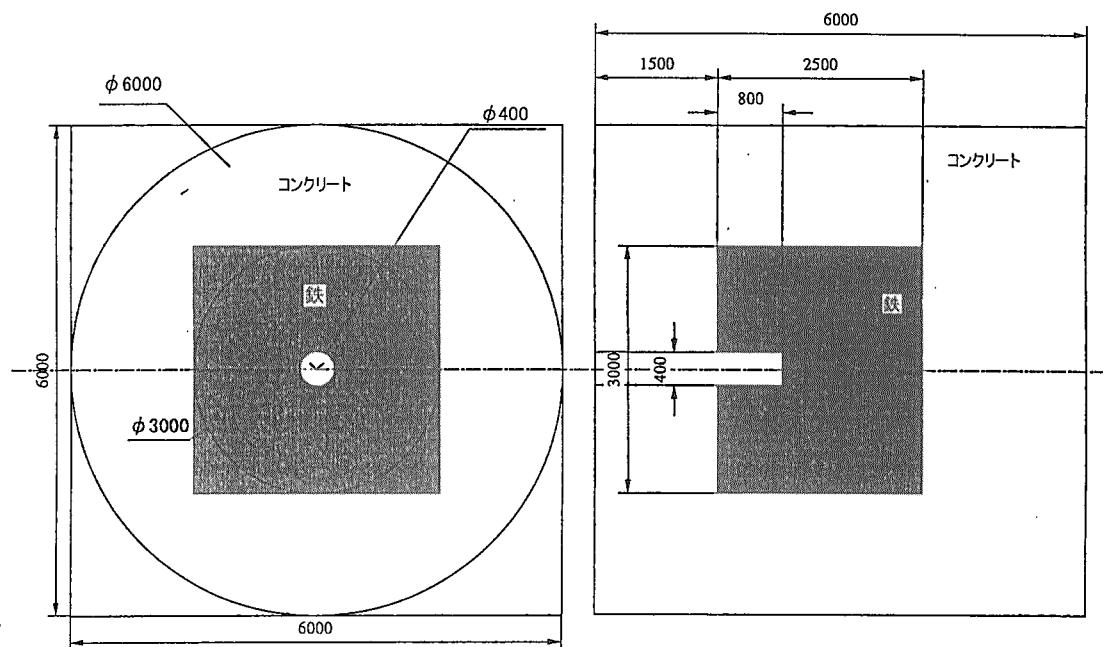


図 2.4.1 入射ビームダンプ構造図

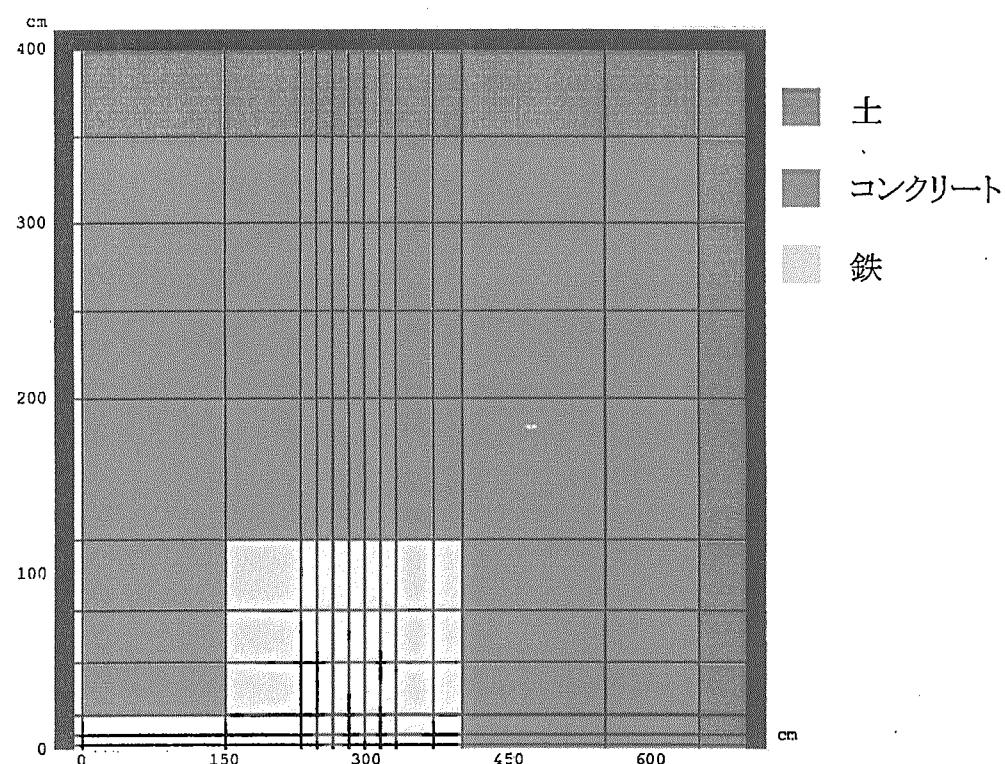


図 2.4.2 MARS コード計算体系

This is a blank page.

## 2.5. 発熱量

上記条件の下で、1kW 廃棄ビームによる発熱量の算出を行った。発熱量の算出に使用した物性値を表 2.5.1 に、計算結果を表 2.5.2 に示す。発熱量は、図 2.4.2 に示したメッシュで切られた領域毎に計算されている。

表 2.5.1 計算に使用した物質の物性値

	平均原子量	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]
鉄	55.845	7.87
コンクリート	24.211	2.35
土	20.485	1.9
空気	14.803	0.001

表 2.5.2 入射ビームダンプ発熱密度計算結果

R1(cm)	R2(cm)	Z1(cm)	Z2(cm)	ED(GeV/g)	W
0.000000E+00	2.857000E+00	-1.000000E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	—
2.857000E+00	8.571000E+00	-1.000000E+01	0.000000E+00	1.455530E+04	—
8.571000E+00	2.000000E+01	-1.000000E+01	0.000000E+00	1.920040E+04	—
2.000000E+01	5.000000E+01	-1.000000E+01	0.000000E+00	9.772940E+00	—
5.000000E+01	8.000000E+01	-1.000000E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	—
8.000000E+01	1.200000E+02	-1.000000E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	—
1.200000E+02	2.000000E+02	-1.000000E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	—
2.000000E+02	2.500000E+02	-1.000000E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	—
2.500000E+02	3.000000E+02	-1.000000E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	—
3.000000E+02	3.500000E+02	-1.000000E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	—
3.500000E+02	4.000000E+02	-1.000000E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	—
0.000000E+00	2.857000E+00	0.000000E+00	1.500000E+02	0.000000E+00	—
2.857000E+00	8.571000E+00	0.000000E+00	1.500000E+02	0.000000E+00	—
8.571000E+00	2.000000E+01	0.000000E+00	1.500000E+02	0.000000E+00	—
2.000000E+01	5.000000E+01	0.000000E+00	1.500000E+02	1.792630E+03	9.488302E-01
5.000000E+01	8.000000E+01	0.000000E+00	1.500000E+02	1.358750E+02	7.191797E-02
8.000000E+01	1.200000E+02	0.000000E+00	1.500000E+02	2.735740E+01	2.574247E-02
1.200000E+02	2.000000E+02	0.000000E+00	1.500000E+02	3.417770E-01	3.628325E-04
2.000000E+02	2.500000E+02	0.000000E+00	1.500000E+02	0.000000E+00	0.000000E+00
2.500000E+02	3.000000E+02	0.000000E+00	1.500000E+02	0.000000E+00	0.000000E+00
3.000000E+02	3.500000E+02	0.000000E+00	1.500000E+02	0.000000E+00	0.000000E+00

3. 500000E+02	4. 000000E+02	0. 000000E+00	1. 500000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
0. 000000E+00	2. 857000E+00	1. 500000E+02	2. 300000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
2. 857000E+00	8. 571000E+00	1. 500000E+02	2. 300000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
8. 571000E+00	2. 000000E+01	1. 500000E+02	2. 300000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
2. 000000E+01	5. 000000E+01	1. 500000E+02	2. 300000E+02	1. 281130E+04	3. 616511E+00
5. 000000E+01	8. 000000E+01	1. 500000E+02	2. 300000E+02	1. 648760E+03	4. 654296E-01
8. 000000E+01	1. 200000E+02	1. 500000E+02	2. 300000E+02	3. 561010E+02	1. 787093E-01
1. 200000E+02	2. 000000E+02	1. 500000E+02	2. 300000E+02	4. 298820E+01	2. 433949E-02
2. 000000E+02	2. 500000E+02	1. 500000E+02	2. 300000E+02	6. 269140E-02	1. 386533E-05
2. 500000E+02	3. 000000E+02	1. 500000E+02	2. 300000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
3. 000000E+02	3. 500000E+02	1. 500000E+02	2. 300000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
3. 500000E+02	4. 000000E+02	1. 500000E+02	2. 300000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
0. 000000E+00	2. 857000E+00	2. 300000E+02	2. 466700E+02	1. 783830E+08	9. 516421E+01
2. 857000E+00	8. 571000E+00	2. 300000E+02	2. 466700E+02	1. 038270E+08	2. 215595E+02
8. 571000E+00	2. 000000E+01	2. 300000E+02	2. 466700E+02	1. 496720E+07	1. 277782E+02
2. 000000E+01	5. 000000E+01	2. 300000E+02	2. 466700E+02	4. 291890E+04	2. 524590E+00
5. 000000E+01	8. 000000E+01	2. 300000E+02	2. 466700E+02	3. 828710E+03	2. 252136E-01
8. 000000E+01	1. 200000E+02	2. 300000E+02	2. 466700E+02	6. 575950E+02	6. 876670E-02
1. 200000E+02	2. 000000E+02	2. 300000E+02	2. 466700E+02	7. 293570E+01	8. 604941E-03
2. 000000E+02	2. 500000E+02	2. 300000E+02	2. 466700E+02	3. 934650E-01	1. 813318E-05
2. 500000E+02	3. 000000E+02	2. 300000E+02	2. 466700E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
3. 000000E+02	3. 500000E+02	2. 300000E+02	2. 466700E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
3. 500000E+02	4. 000000E+02	2. 300000E+02	2. 466700E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
0. 000000E+00	2. 857000E+00	2. 466700E+02	2. 633300E+02	1. 526150E+06	8. 136859E-01
2. 857000E+00	8. 571000E+00	2. 466700E+02	2. 633300E+02	1. 072950E+06	2. 288227E+00
8. 571000E+00	2. 000000E+01	2. 466700E+02	2. 633300E+02	4. 719500E+05	4. 026721E+00
2. 000000E+01	5. 000000E+01	2. 466700E+02	2. 633300E+02	5. 066050E+04	2. 978181E+00
5. 000000E+01	8. 000000E+01	2. 466700E+02	2. 633300E+02	4. 324160E+03	2. 542046E-01
8. 000000E+01	1. 200000E+02	2. 466700E+02	2. 633300E+02	6. 634500E+02	6. 933735E-02
1. 200000E+02	2. 000000E+02	2. 466700E+02	2. 633300E+02	7. 303930E+01	8. 611994E-03
2. 000000E+02	2. 500000E+02	2. 466700E+02	2. 633300E+02	3. 392160E-01	1. 562369E-05
2. 500000E+02	3. 000000E+02	2. 466700E+02	2. 633300E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
3. 000000E+02	3. 500000E+02	2. 466700E+02	2. 633300E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
3. 500000E+02	4. 000000E+02	2. 466700E+02	2. 633300E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
0. 000000E+00	2. 857000E+00	2. 633300E+02	2. 800000E+02	2. 161480E+05	1. 153112E-01
2. 857000E+00	8. 571000E+00	2. 633300E+02	2. 800000E+02	2. 191390E+05	4. 676273E-01

8. 571000E+00	2. 000000E+01	2. 633300E+02	2. 800000E+02	1. 450820E+05	1. 238596E+00
2. 000000E+01	5. 000000E+01	2. 633300E+02	2. 800000E+02	3. 140660E+04	1. 847409E+00
5. 000000E+01	8. 000000E+01	2. 633300E+02	2. 800000E+02	3. 824560E+03	2. 249695E-01
8. 000000E+01	1. 200000E+02	2. 633300E+02	2. 800000E+02	6. 391690E+02	6. 683984E-02
1. 200000E+02	2. 000000E+02	2. 633300E+02	2. 800000E+02	7. 497140E+01	8. 845113E-03
2. 000000E+02	2. 500000E+02	2. 633300E+02	2. 800000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
2. 500000E+02	3. 000000E+02	2. 633300E+02	2. 800000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
3. 000000E+02	3. 500000E+02	2. 633300E+02	2. 800000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
3. 500000E+02	4. 000000E+02	2. 633300E+02	2. 800000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
0. 000000E+00	2. 857000E+00	2. 800000E+02	2. 966700E+02	7. 321300E+04	3. 905785E-02
2. 857000E+00	8. 571000E+00	2. 800000E+02	2. 966700E+02	6. 546030E+04	1. 396877E-01
8. 571000E+00	2. 000000E+01	2. 800000E+02	2. 966700E+02	5. 077740E+04	4. 334975E-01
2. 000000E+01	5. 000000E+01	2. 800000E+02	2. 966700E+02	1. 623310E+04	9. 548687E-01
5. 000000E+01	8. 000000E+01	2. 800000E+02	2. 966700E+02	2. 945410E+03	1. 732559E-01
8. 000000E+01	1. 200000E+02	2. 800000E+02	2. 966700E+02	5. 073660E+02	5. 305680E-02
1. 200000E+02	2. 000000E+02	2. 800000E+02	2. 966700E+02	5. 989450E+01	7. 066343E-03
2. 000000E+02	2. 500000E+02	2. 800000E+02	2. 966700E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
2. 500000E+02	3. 000000E+02	2. 800000E+02	2. 966700E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
3. 000000E+02	3. 500000E+02	2. 800000E+02	2. 966700E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
3. 500000E+02	4. 000000E+02	2. 800000E+02	2. 966700E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
0. 000000E+00	2. 857000E+00	2. 966700E+02	3. 133300E+02	1. 090150E+04	5. 812271E-03
2. 857000E+00	8. 571000E+00	2. 966700E+02	3. 133300E+02	1. 981350E+04	4. 225526E-02
8. 571000E+00	2. 000000E+01	2. 966700E+02	3. 133300E+02	1. 606220E+04	1. 370442E-01
2. 000000E+01	5. 000000E+01	2. 966700E+02	3. 133300E+02	7. 284720E+03	4. 282471E-01
5. 000000E+01	8. 000000E+01	2. 966700E+02	3. 133300E+02	1. 980910E+03	1. 164518E-01
8. 000000E+01	1. 200000E+02	2. 966700E+02	3. 133300E+02	3. 583950E+02	3. 745597E-02
1. 200000E+02	2. 000000E+02	2. 966700E+02	3. 133300E+02	4. 317820E+01	5. 091101E-03
2. 000000E+02	2. 500000E+02	2. 966700E+02	3. 133300E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
2. 500000E+02	3. 000000E+02	2. 966700E+02	3. 133300E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
3. 000000E+02	3. 500000E+02	2. 966700E+02	3. 133300E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
3. 500000E+02	4. 000000E+02	2. 966700E+02	3. 133300E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
0. 000000E+00	2. 857000E+00	3. 133300E+02	3. 300000E+02	1. 079240E+04	5. 757556E-03
2. 857000E+00	8. 571000E+00	3. 133300E+02	3. 300000E+02	9. 106160E+03	1. 943191E-02
8. 571000E+00	2. 000000E+01	3. 133300E+02	3. 300000E+02	6. 726980E+03	5. 742967E-02
2. 000000E+01	5. 000000E+01	3. 133300E+02	3. 300000E+02	3. 603540E+03	2. 119686E-01
5. 000000E+01	8. 000000E+01	3. 133300E+02	3. 300000E+02	1. 207600E+03	7. 103384E-02

8.000000E+01	1.200000E+02	3.133300E+02	3.300000E+02	2.478480E+02	2.591822E-02
1.200000E+02	2.000000E+02	3.133300E+02	3.300000E+02	3.705870E+01	4.372179E-03
2.000000E+02	2.500000E+02	3.133300E+02	3.300000E+02	0.000000E+00	0.000000E+00
2.500000E+02	3.000000E+02	3.133300E+02	3.300000E+02	0.000000E+00	0.000000E+00
3.000000E+02	3.500000E+02	3.133300E+02	3.300000E+02	0.000000E+00	0.000000E+00
3.500000E+02	4.000000E+02	3.133300E+02	3.300000E+02	0.000000E+00	0.000000E+00
0.000000E+00	2.857000E+00	3.300000E+02	3.700000E+02	1.091160E+03	1.396796E-03
2.857000E+00	8.571000E+00	3.300000E+02	3.700000E+02	1.308830E+03	6.701743E-03
8.571000E+00	2.000000E+01	3.300000E+02	3.700000E+02	1.423930E+03	2.916951E-02
2.000000E+01	5.000000E+01	3.300000E+02	3.700000E+02	9.862620E+02	1.392063E-01
5.000000E+01	8.000000E+01	3.300000E+02	3.700000E+02	3.961600E+02	5.591614E-02
8.000000E+01	1.200000E+02	3.300000E+02	3.700000E+02	1.123390E+02	2.818867E-02
1.200000E+02	2.000000E+02	3.300000E+02	3.700000E+02	2.125780E+01	6.017976E-03
2.000000E+02	2.500000E+02	3.300000E+02	3.700000E+02	1.632300E-01	1.805062E-05
2.500000E+02	3.000000E+02	3.300000E+02	3.700000E+02	0.000000E+00	0.000000E+00
3.000000E+02	3.500000E+02	3.300000E+02	3.700000E+02	0.000000E+00	0.000000E+00
3.500000E+02	4.000000E+02	3.300000E+02	3.700000E+02	0.000000E+00	0.000000E+00
0.000000E+00	2.857000E+00	3.700000E+02	4.000000E+02	1.479510E+02	1.420443E-04
2.857000E+00	8.571000E+00	3.700000E+02	4.000000E+02	4.899510E+02	1.881562E-03
8.571000E+00	2.000000E+01	3.700000E+02	4.000000E+02	3.084060E+02	4.738323E-03
2.000000E+01	5.000000E+01	3.700000E+02	4.000000E+02	1.515710E+02	1.604516E-02
5.000000E+01	8.000000E+01	3.700000E+02	4.000000E+02	8.827630E+01	9.344842E-03
8.000000E+01	1.200000E+02	3.700000E+02	4.000000E+02	2.944580E+01	5.541517E-03
1.200000E+02	2.000000E+02	3.700000E+02	4.000000E+02	3.767240E+00	7.998650E-04
2.000000E+02	2.500000E+02	3.700000E+02	4.000000E+02	2.025460E+00	1.679876E-04
2.500000E+02	3.000000E+02	3.700000E+02	4.000000E+02	0.000000E+00	0.000000E+00
3.000000E+02	3.500000E+02	3.700000E+02	4.000000E+02	0.000000E+00	0.000000E+00
3.500000E+02	4.000000E+02	3.700000E+02	4.000000E+02	0.000000E+00	0.000000E+00
0.000000E+00	2.857000E+00	4.000000E+02	5.500000E+02	6.734900E+01	3.233010E-04
2.857000E+00	8.571000E+00	4.000000E+02	5.500000E+02	1.161900E+01	2.231026E-04
8.571000E+00	2.000000E+01	4.000000E+02	5.500000E+02	1.398380E+01	1.074229E-03
2.000000E+01	5.000000E+01	4.000000E+02	5.500000E+02	1.464470E+01	7.751368E-03
5.000000E+01	8.000000E+01	4.000000E+02	5.500000E+02	1.093170E+01	5.786095E-03
8.000000E+01	1.200000E+02	4.000000E+02	5.500000E+02	3.741660E+00	3.520786E-03
1.200000E+02	2.000000E+02	4.000000E+02	5.500000E+02	1.095480E+00	1.162968E-03
2.000000E+02	2.500000E+02	4.000000E+02	5.500000E+02	1.236660E-01	5.128304E-05

2. 500000E+02	3. 000000E+02	4. 000000E+02	5. 500000E+02	6. 390450E-01	2. 650055E-04
3. 000000E+02	3. 500000E+02	4. 000000E+02	5. 500000E+02	1. 711870E-01	7. 098952E-05
3. 500000E+02	4. 000000E+02	4. 000000E+02	5. 500000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
0. 000000E+00	2. 857000E+00	5. 500000E+02	6. 500000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
2. 857000E+00	8. 571000E+00	5. 500000E+02	6. 500000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
8. 571000E+00	2. 000000E+01	5. 500000E+02	6. 500000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
2. 000000E+01	5. 000000E+01	5. 500000E+02	6. 500000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
5. 000000E+01	8. 000000E+01	5. 500000E+02	6. 500000E+02	1. 843180E-01	1. 834435E-05
8. 000000E+01	1. 200000E+02	5. 500000E+02	6. 500000E+02	9. 647040E-01	1. 706893E-04
1. 200000E+02	2. 000000E+02	5. 500000E+02	6. 500000E+02	9. 899190E-02	7. 006027E-05
2. 000000E+02	2. 500000E+02	5. 500000E+02	6. 500000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
2. 500000E+02	3. 000000E+02	5. 500000E+02	6. 500000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
3. 000000E+02	3. 500000E+02	5. 500000E+02	6. 500000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
3. 500000E+02	4. 000000E+02	5. 500000E+02	6. 500000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
0. 000000E+00	2. 857000E+00	6. 500000E+02	7. 000000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
2. 857000E+00	8. 571000E+00	6. 500000E+02	7. 000000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
8. 571000E+00	2. 000000E+01	6. 500000E+02	7. 000000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
2. 000000E+01	5. 000000E+01	6. 500000E+02	7. 000000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
5. 000000E+01	8. 000000E+01	6. 500000E+02	7. 000000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
8. 000000E+01	1. 200000E+02	6. 500000E+02	7. 000000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
1. 200000E+02	2. 000000E+02	6. 500000E+02	7. 000000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
2. 000000E+02	2. 500000E+02	6. 500000E+02	7. 000000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
2. 500000E+02	3. 000000E+02	6. 500000E+02	7. 000000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
3. 000000E+02	3. 500000E+02	6. 500000E+02	7. 000000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00
3. 500000E+02	4. 000000E+02	6. 500000E+02	7. 000000E+02	0. 000000E+00	0. 000000E+00

### 3 入射ビームダンプ内の温度分布解析

MARS コードによって計算された発熱量を構造解析計算コード ANSYS に入力して温度分布解析計算及び熱応力解析計算を行った[9][10]。このときのビーム条件は、ビーム照射時間 3 週間と 5 日間の照射停止を 1 サイクルとして年 6 サイクルの 156 日間とする。図 3.1 ~ 図 3.5 に計算モデル図、表 3.1 に使用物性値、図 3.6 に初期温度条件、図 3.7 に 1 kW ビーム照射時計算結果出力ポイント、図 3.8 に 10 kW ビーム照射時計算結果出力ポイントを示す。なお、鉄については板材を積層するため、板材間のギャップによる接触熱抵抗を考慮し、安全側の数値を与えた[11]。同時に、コンクリート周囲の水を含有する砂についても、安全側に配慮し評価値[12]の半分とした。ビーム条件は 400 MeV, 1 kW だが、参考計算として 10 kW 運転想定時の計算も行った。ビーム条件はビーム照射 10 日間と 5 日間の照射停止である。

この計算はコンクリートの安全使用温度上限値(許容耐熱温度) 333 K をクリア出来るかを確認するための計算である。本解析結果から、1 kW ビーム条件においてはコンクリート内最高温度は約 320 K であり、コンクリートの使用条件を満たしている。しかし、10 kW ビーム時には 360 K 以上となり、使用条件を満たさないことが確認できた。以下に上記計算結果の図表リストを示す。

- 図 3.9 TIME POINT 1 (21 日経過時) 温度分布 モデル全体
- 図 3.10 TIME POINT 2 (26 日経過時) 温度分布 モデル全体
- 図 3.11 TIME POINT 3 (47 日経過時) 温度分布 モデル全体
- 図 3.12 TIME POINT 4 (52 日経過時) 温度分布 モデル全体
- 図 3.13 TIME POINT 5 (73 日経過時) 温度分布 モデル全体
- 図 3.14 TIME POINT 6 (78 日経過時) 温度分布 モデル全体
- 図 3.15 TIME POINT 7 (99 日経過時) 温度分布 モデル全体
- 図 3.16 TIME POINT 8 (104 日経過時) 温度分布 モデル全体
- 図 3.17 TIME POINT 9 (125 日経過時) 温度分布 モデル全体
- 図 3.18 TIME POINT 10 (130 日経過時) 温度分布 モデル全体
- 図 3.19 TIME POINT 11 (151 日経過時) 温度分布 モデル全体
- 図 3.20 TIME POINT 12 (156 日経過時) 温度分布 モデル全体
- 図 3.21 TIME POINT 1 (21 日経過時) 温度分布 鉄部
- 図 3.22 TIME POINT 2 (26 日経過時) 温度分布 鉄部
- 図 3.23 TIME POINT 3 (47 日経過時) 温度分布 鉄部
- 図 3.24 TIME POINT 4 (52 日経過時) 温度分布 鉄部
- 図 3.25 TIME POINT 5 (73 日経過時) 温度分布 鉄部
- 図 3.26 TIME POINT 6 (78 日経過時) 温度分布 鉄部
- 図 3.27 TIME POINT 7 (99 日経過時) 温度分布 鉄部
- 図 3.28 TIME POINT 8 (104 日経過時) 温度分布 鉄部
- 図 3.29 TIME POINT 9 (125 日経過時) 温度分布 鉄部

- 図 3.30 TIME POINT 10 (130 日経過時) 温度分布 鉄部  
図 3.31 TIME POINT 11 (151 日経過時) 温度分布 鉄部  
図 3.32 TIME POINT 12 (156 日経過時) 温度分布 鉄部  
図 3.33 TIME POINT 1 (21 日経過時) 温度分布 コンクリート部  
図 3.34 TIME POINT 2 (26 日経過時) 温度分布 コンクリート部  
図 3.35 TIME POINT 3 (47 日経過時) 温度分布 コンクリート部  
図 3.36 TIME POINT 4 (52 日経過時) 温度分布 コンクリート部  
図 3.37 TIME POINT 5 (73 日経過時) 温度分布 コンクリート部  
図 3.38 TIME POINT 6 (78 日経過時) 温度分布 コンクリート部  
図 3.39 TIME POINT 7 (99 日経過時) 温度分布 コンクリート部  
図 3.40 TIME POINT 8 (104 日経過時) 温度分布 コンクリート部  
図 3.41 TIME POINT 9 (125 日経過時) 温度分布 コンクリート部  
図 3.42 TIME POINT 10 (130 日経過時) 温度分布 コンクリート部  
図 3.43 TIME POINT 11 (151 日経過時) 温度分布 コンクリート部  
図 3.44 TIME POINT 12 (156 日経過時) 温度分布 コンクリート部  
図 3.45 TIME POINT 1 (21 日経過時) 温度分布 砂部  
図 3.46 TIME POINT 2 (26 日経過時) 温度分布 砂部  
図 3.47 TIME POINT 3 (47 日経過時) 温度分布 砂部  
図 3.48 TIME POINT 4 (52 日経過時) 温度分布 砂部  
図 3.49 TIME POINT 5 (73 日経過時) 温度分布 砂部  
図 3.50 TIME POINT 6 (78 日経過時) 温度分布 砂部  
図 3.51 TIME POINT 7 (99 日経過時) 温度分布 砂部  
図 3.52 TIME POINT 8 (104 日経過時) 温度分布 砂部  
図 3.53 TIME POINT 9 (125 日経過時) 温度分布 砂部  
図 3.54 TIME POINT 10 (130 日経過時) 温度分布 砂部  
図 3.55 TIME POINT 11 (151 日経過時) 温度分布 砂部  
図 3.56 TIME POINT 12 (156 日経過時) 温度分布 砂部  
図 3.57 TIME POINT 1 (21 日経過時) 温度分布 GAP 部(空間部)  
図 3.58 TIME POINT 2 (26 日経過時) 温度分布 GAP 部(空間部)  
図 3.59 TIME POINT 3 (47 日経過時) 温度分布 GAP 部(空間部)  
図 3.60 TIME POINT 4 (52 日経過時) 温度分布 GAP 部(空間部)  
図 3.61 TIME POINT 5 (73 日経過時) 温度分布 GAP 部(空間部)  
図 3.62 TIME POINT 6 (78 日経過時) 温度分布 GAP 部(空間部)  
図 3.63 TIME POINT 7 (99 日経過時) 温度分布 GAP 部(空間部)  
図 3.64 TIME POINT 8 (104 日経過時) 温度分布 GAP 部(空間部)  
図 3.65 TIME POINT 9 (125 日経過時) 温度分布 GAP 部(空間部)  
図 3.66 TIME POINT 10 (130 日経過時) 温度分布 GAP 部(空間部)  
図 3.67 TIME POINT 11 (151 日経過時) 温度分布 GAP 部(空間部)

- 図 3.68 TIME POINT 12 (156 日経過時) 温度分布 GAP 部(空間部)
- 図 3.69 鉄物性内最高温度接点温度推移
- 図 3.70 コンクリート物性内最高温度接点温度推移
- 図 3.71 砂物性内最高温度接点温度推移
- 図 3.72 空間物性内最高温度接点温度推移
- 図 3.73 10kW ビーム 10 日間照射時温度分布 モデル全体
- 図 3.74 10kW ビーム 10 日間照射後 5 日間経過時温度分布 モデル全体
- 図 3.75 10kW ビーム 10 日間照射時温度分布 鉄部
- 図 3.76 10kW ビーム 10 日間照射後 5 日間経過時温度分布 鉄部
- 図 3.77 10kW ビーム 10 日間照射時温度分布 コンクリート部
- 図 3.78 10kW ビーム 10 日間照射後 5 日間経過時温度分布 コンクリート部
- 図 3.79 10kW ビーム 10 日間照射時温度分布 砂部
- 図 3.80 10kW ビーム 10 日間照射後 5 日間経過時温度分布 砂部
- 図 3.81 10kW ビーム 10 日間照射時温度分布 空間部
- 図 3.82 10kW ビーム 10 日間照射後 5 日間経過時温度分布 空間部
- 図 3.83 鉄物性内最高温度接点温度推移 10kW ビーム
- 図 3.84 コンクリート物性内最高温度接点温度推移 10kW ビーム
- 図 3.85 砂物性内最高温度接点温度推移 10kW ビーム
- 図 3.86 空間物性内最高温度接点温度推移 10kW ビーム

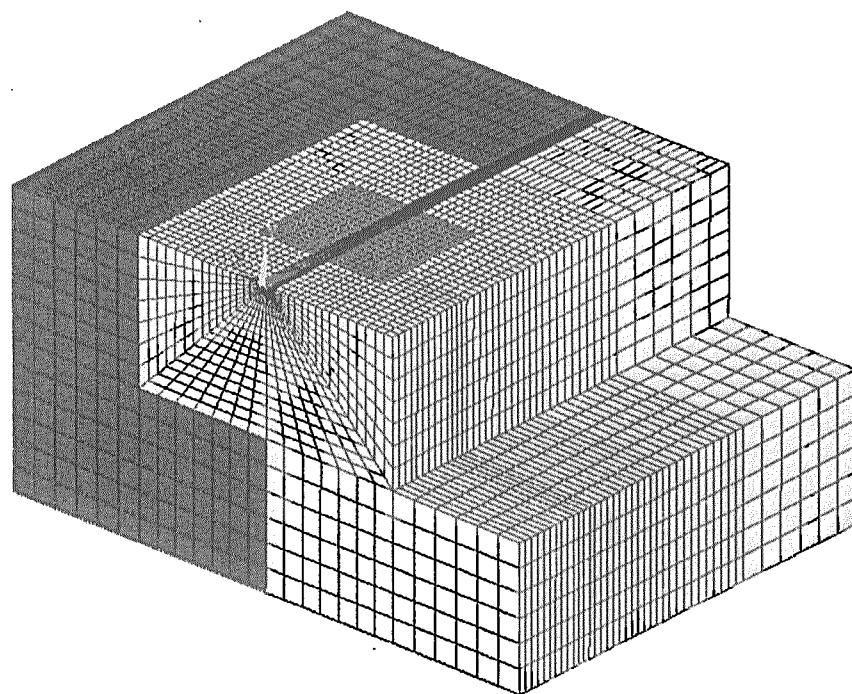
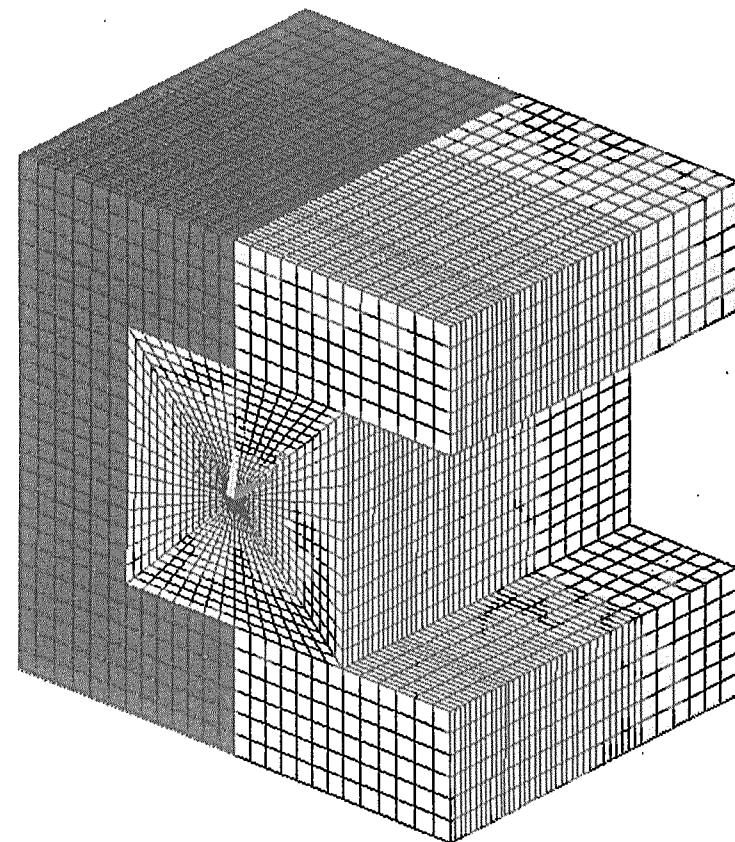


図3.1 入射ビームダンプ計算モデル全体図

This is a blank page.

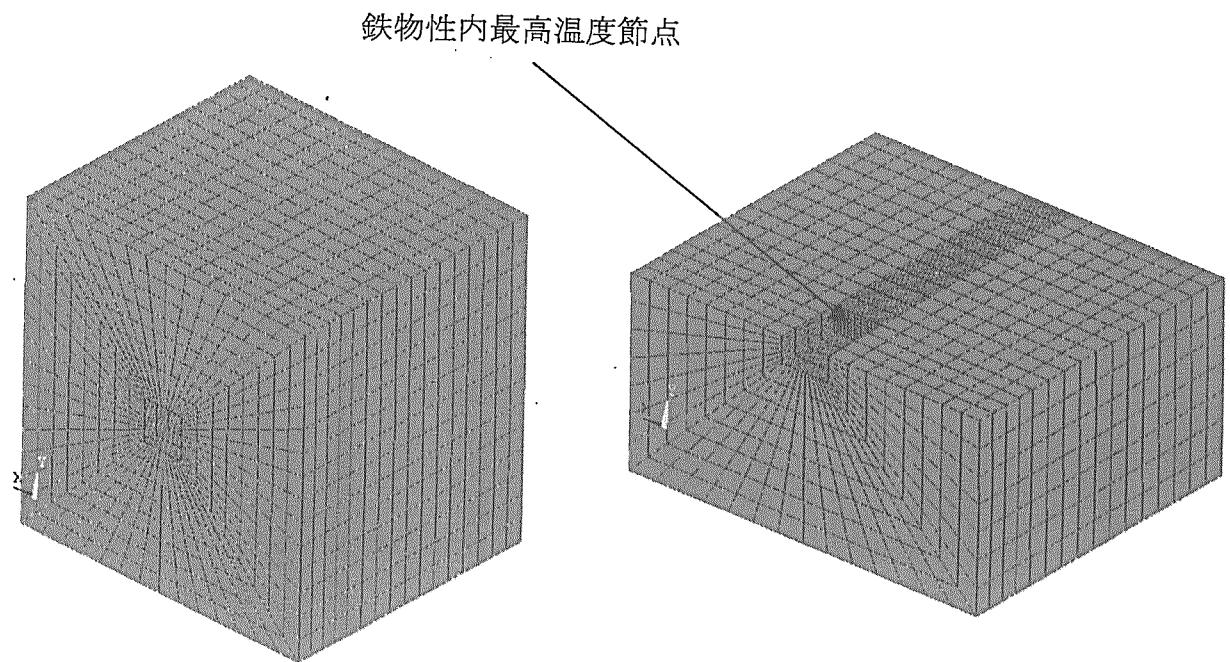


図3.2 MAT1 鉄部

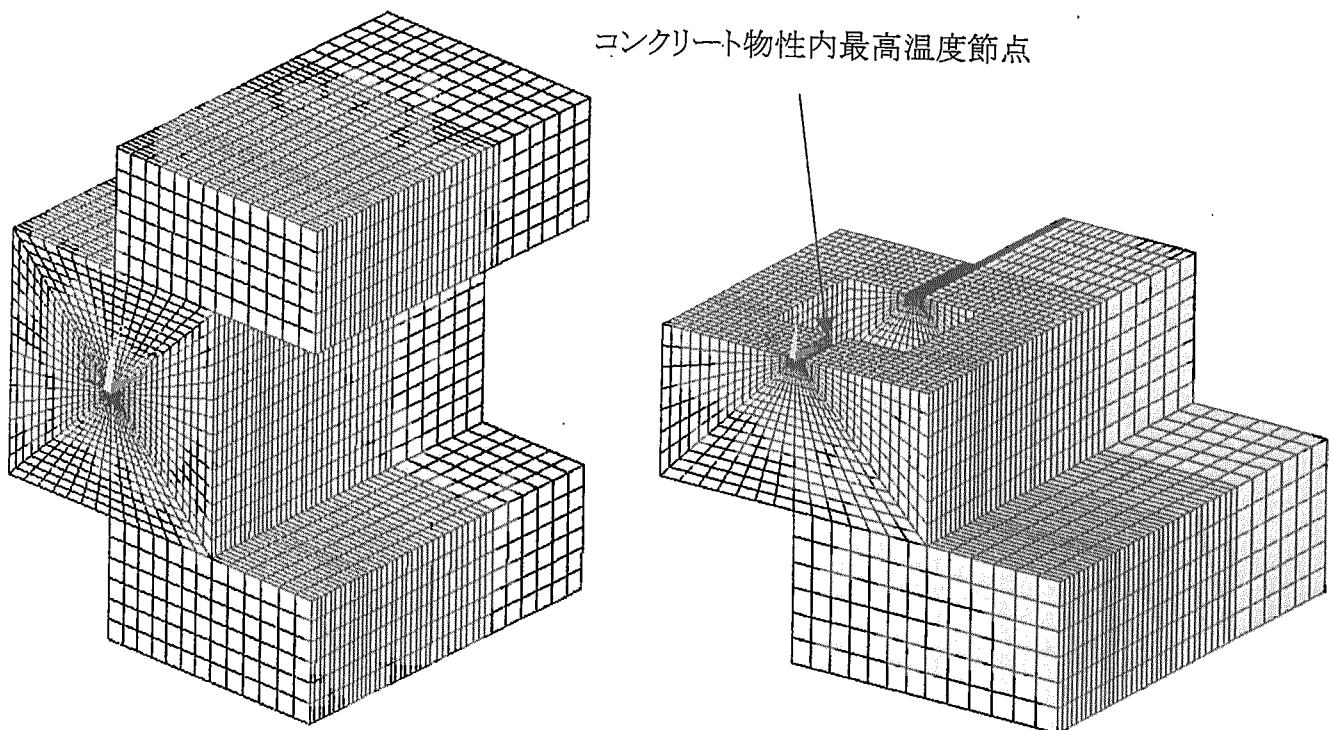


図3.3 MAT2 コンクリート部

This is a blank page.

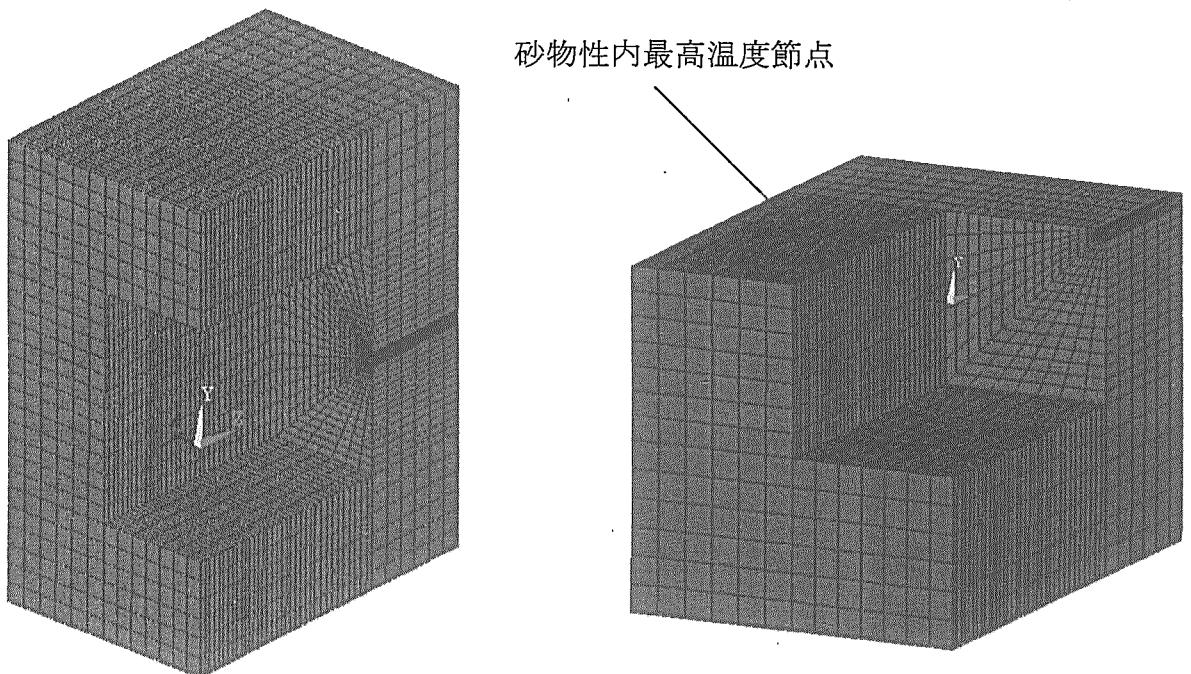


図3.4 MAT3 砂部

空間物性内最高温度節点

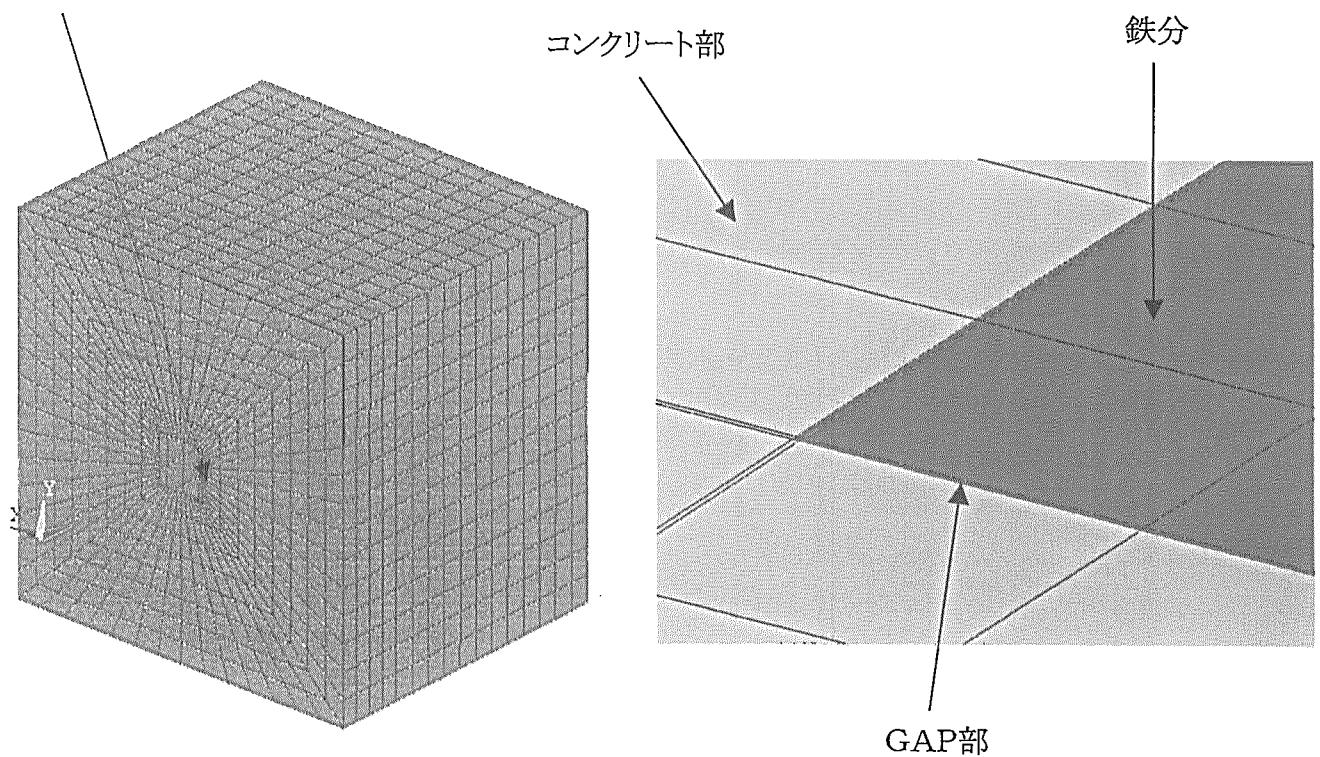


図3.5 MAT4 GAP部(空間部)

This is a blank page.

表3.1入射ビームダンプ温度分布解析計算使用物性値表

	密度(Kg/立方メートル)	比熱(J/Kg°C)	熱伝導率(W/m°C)
鉄 (MAT1)	7800	529	20.58
コンクリート(MAT2) (*1)	2200	900	1.6
砂+水(MAT3)	1600	900	0.4
GAP (MAT4)	1.1763	1007	2.61E-2

(\*1)「鉄筋コンクリート構造計画基準・同解説」、日本建築学会、p47(1988).

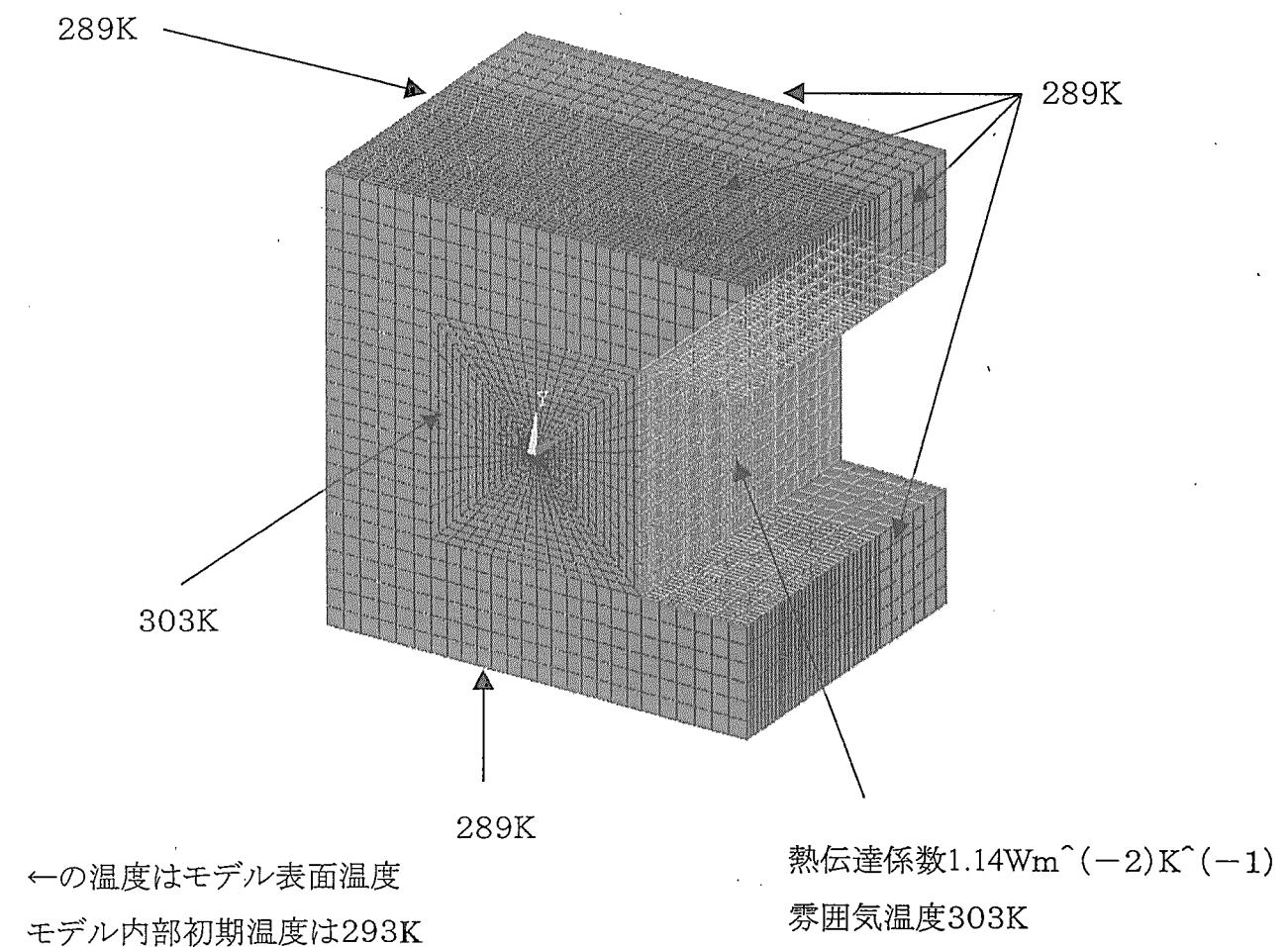


図3.6 初期温度条件

This is a blank page.

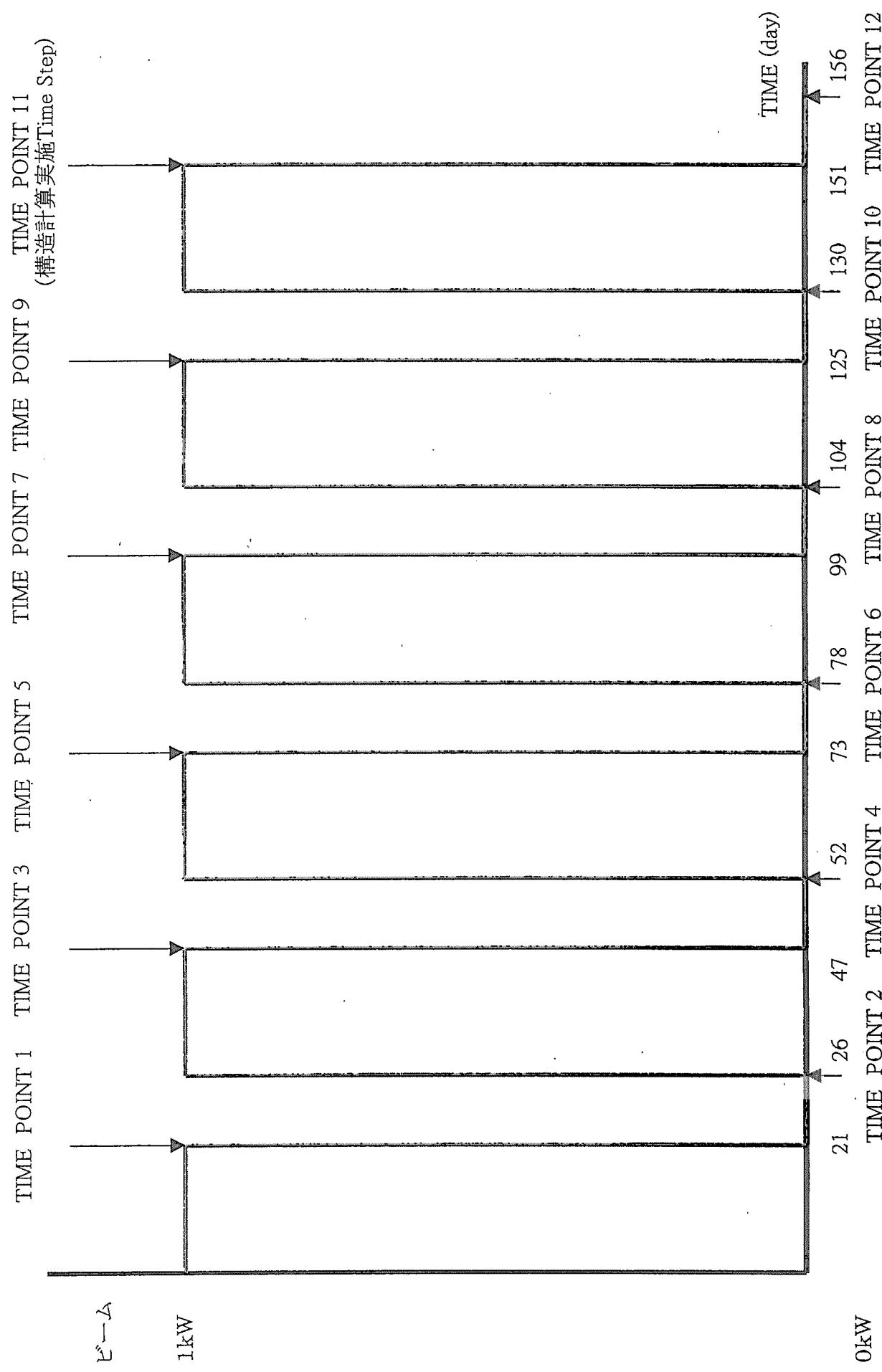


図3.7 1kWビーム照射時計算結果出力ポイン

This is a blank page.

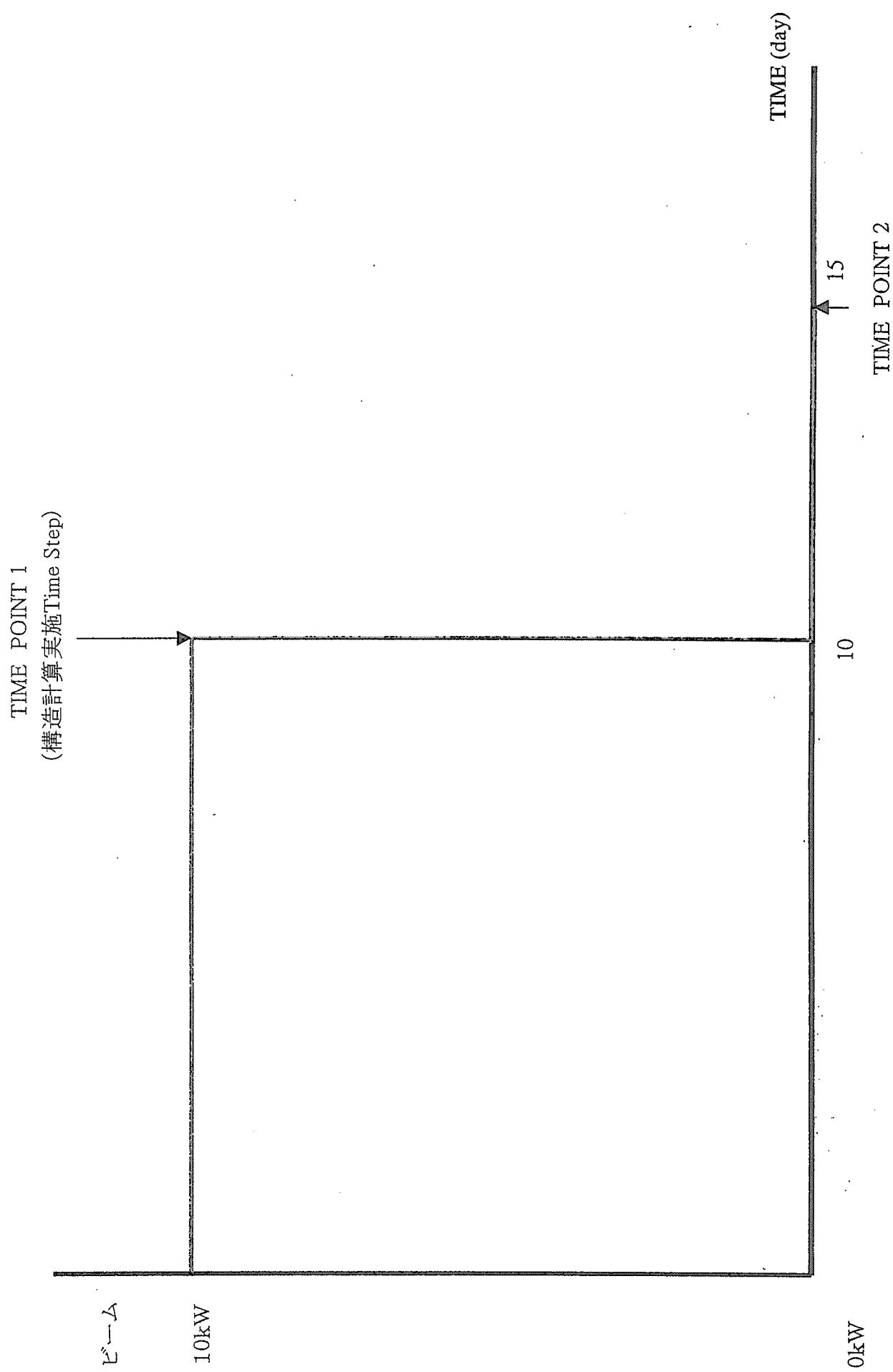


図3.8 10kWビーム照射時計算結果出力ポイント

This is a blank page.

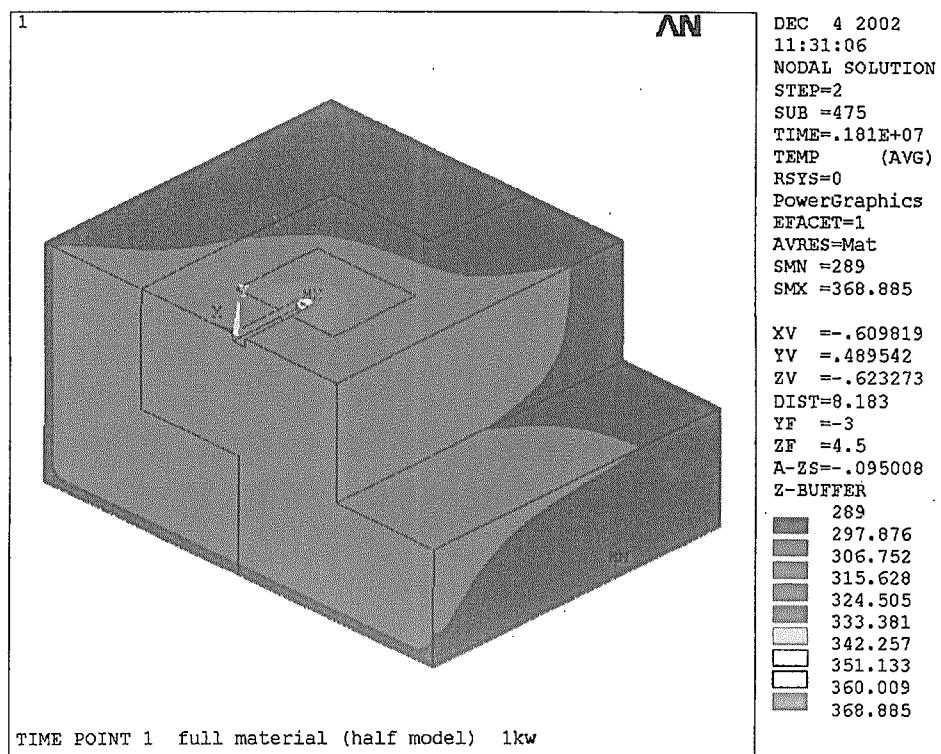


図3.9 TIME POINT 1 (21日経過時) 温度分布 モデル全体

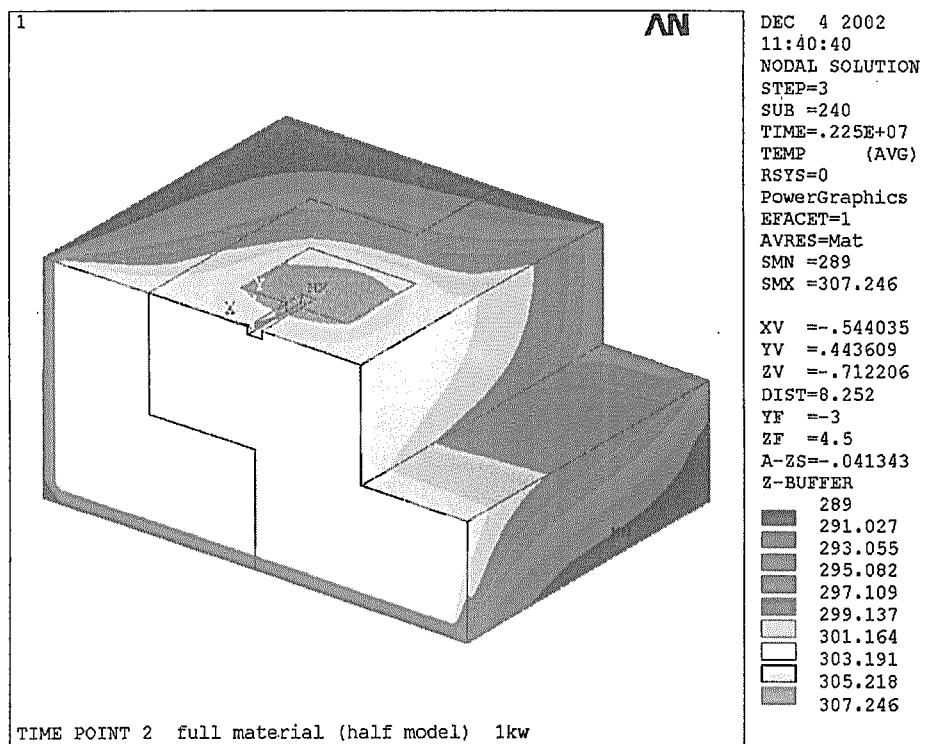


図3.10 TIME POINT 2 (26日経過時) 温度分布 モデル全体

This is a blank page.

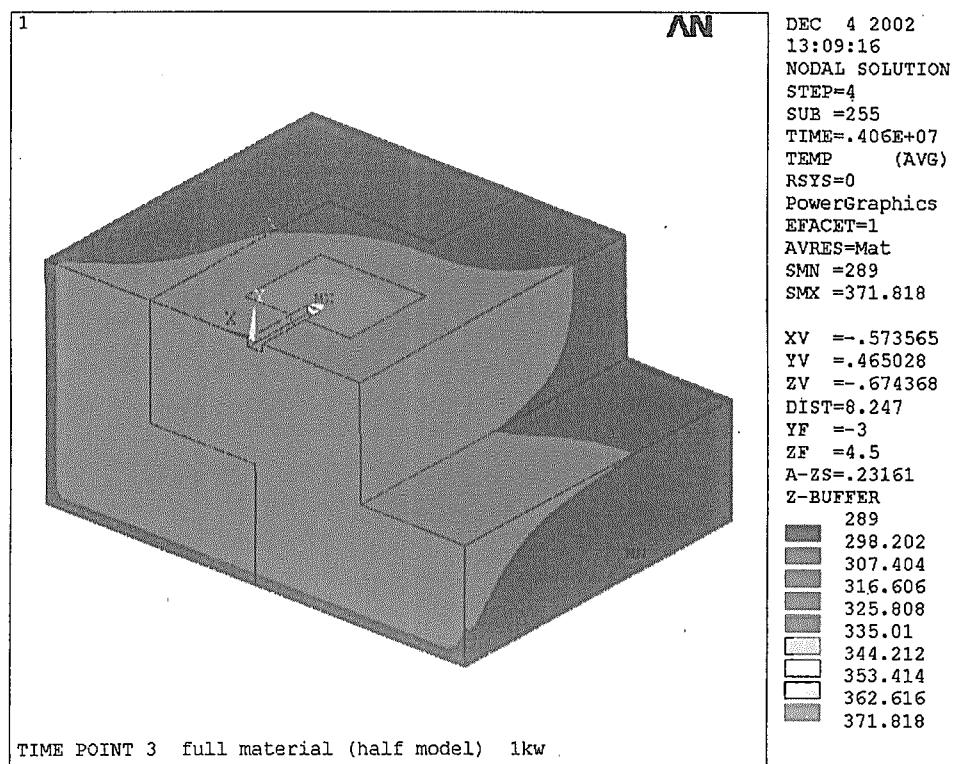


図3.11 TIME POINT 3 (47日経過時) 温度分布 モデル全体

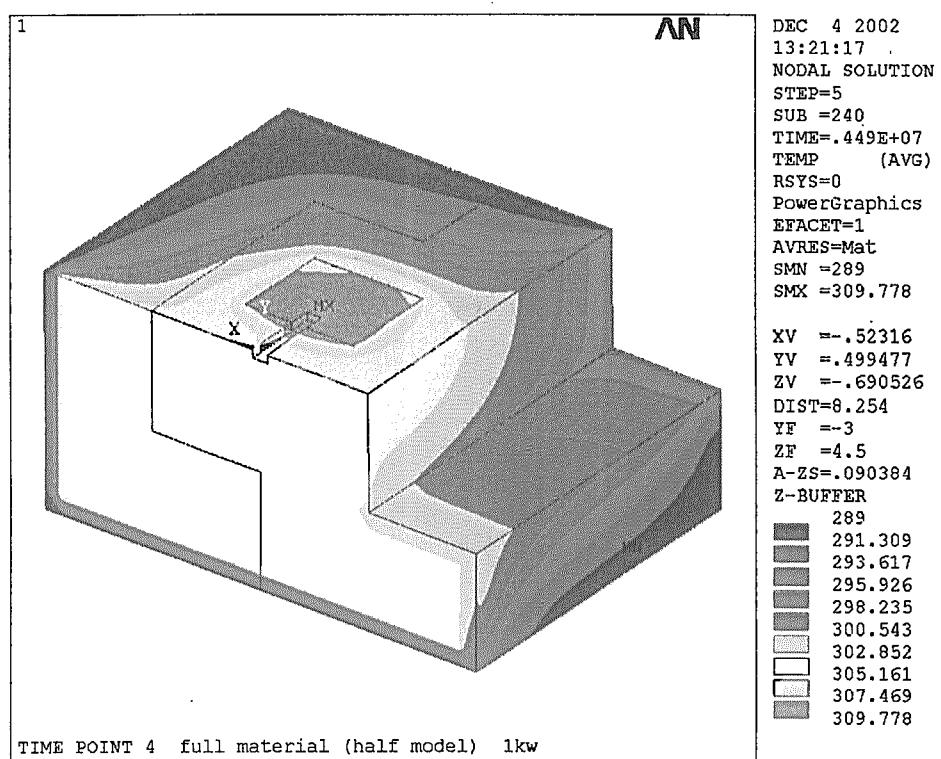


図3.12 TIME POINT 4 (52日経過時) 温度分布 モデル全体

This is a blank page.

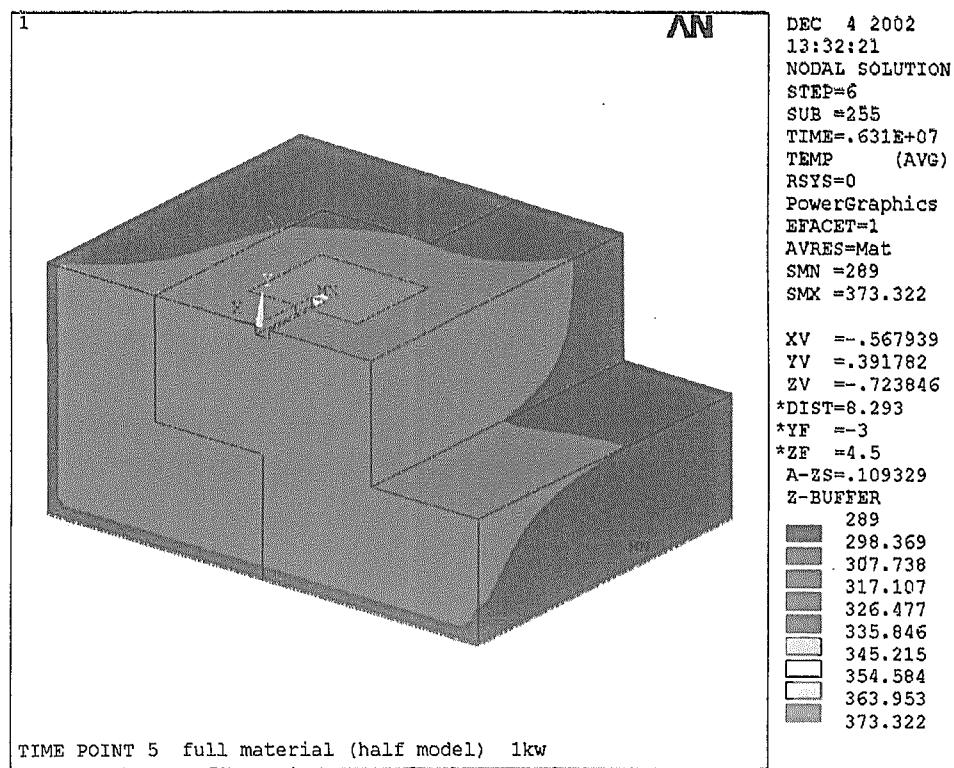


図3.13 TIME POINT 5 (73日経過時) 温度分布 モデル全体

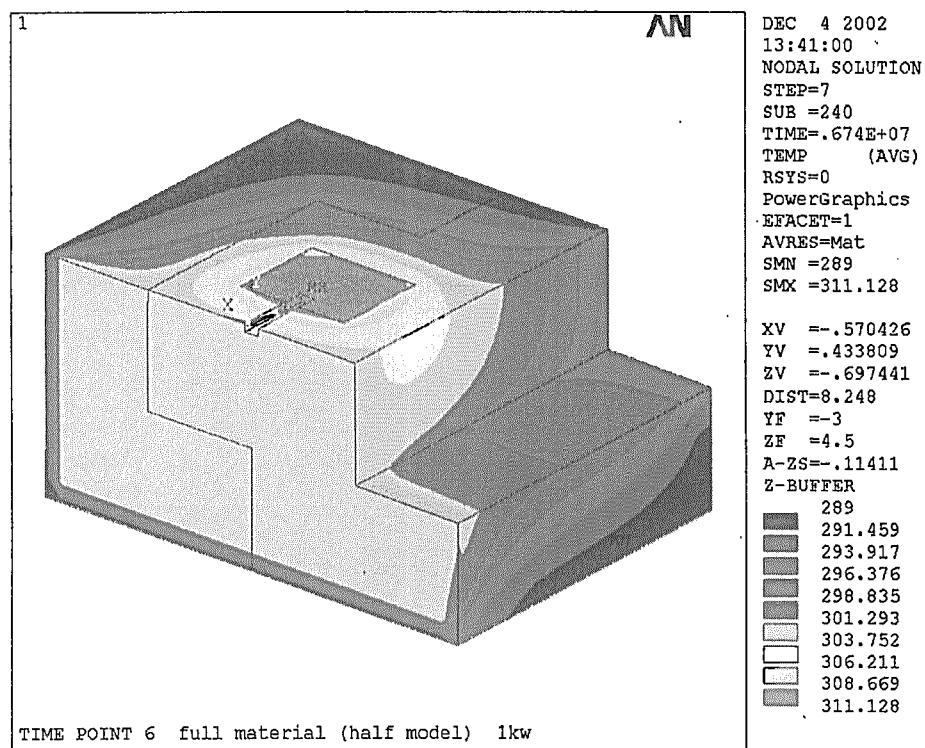


図3.14 TIME POINT 6 (78日経過時) 温度分布 モデル全体

This is a blank page.

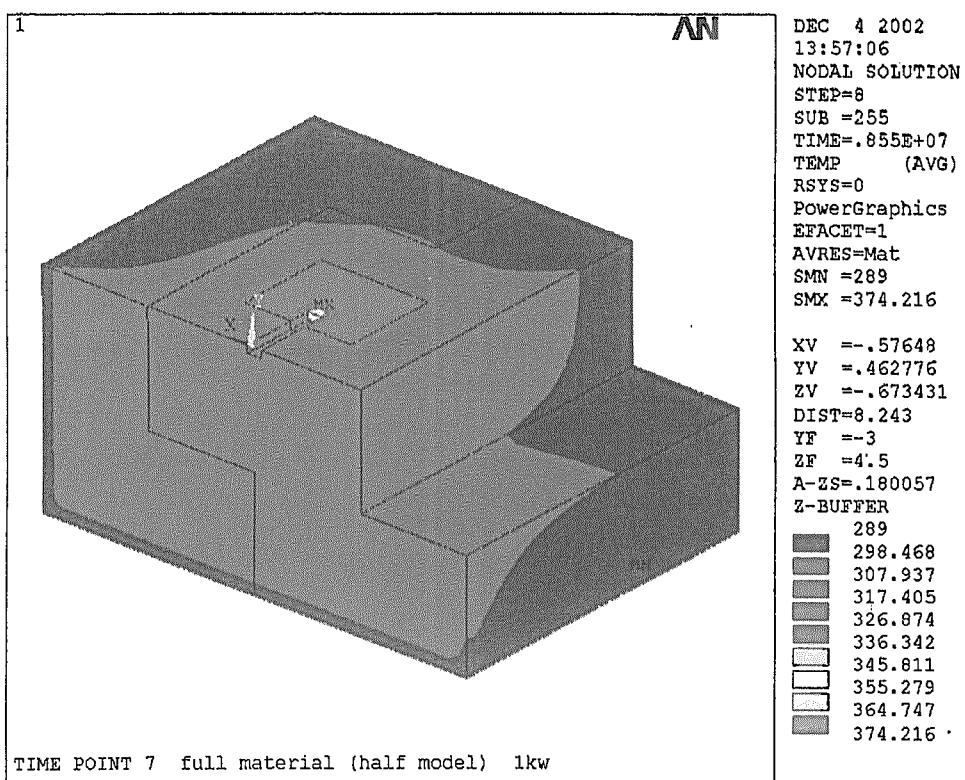


図3.15 TIME POINT 7 (99日経過時) 温度分布 モデル全体

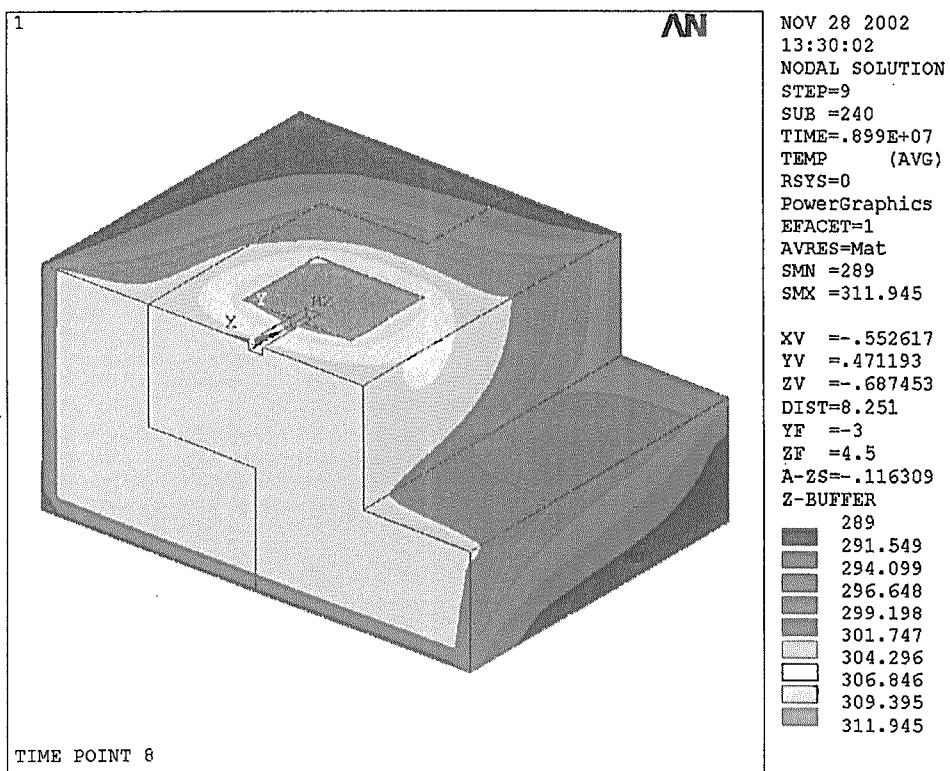


図3.16 TIME POINT 8 (104日経過時) 温度分布 モデル全体

This is a blank page.

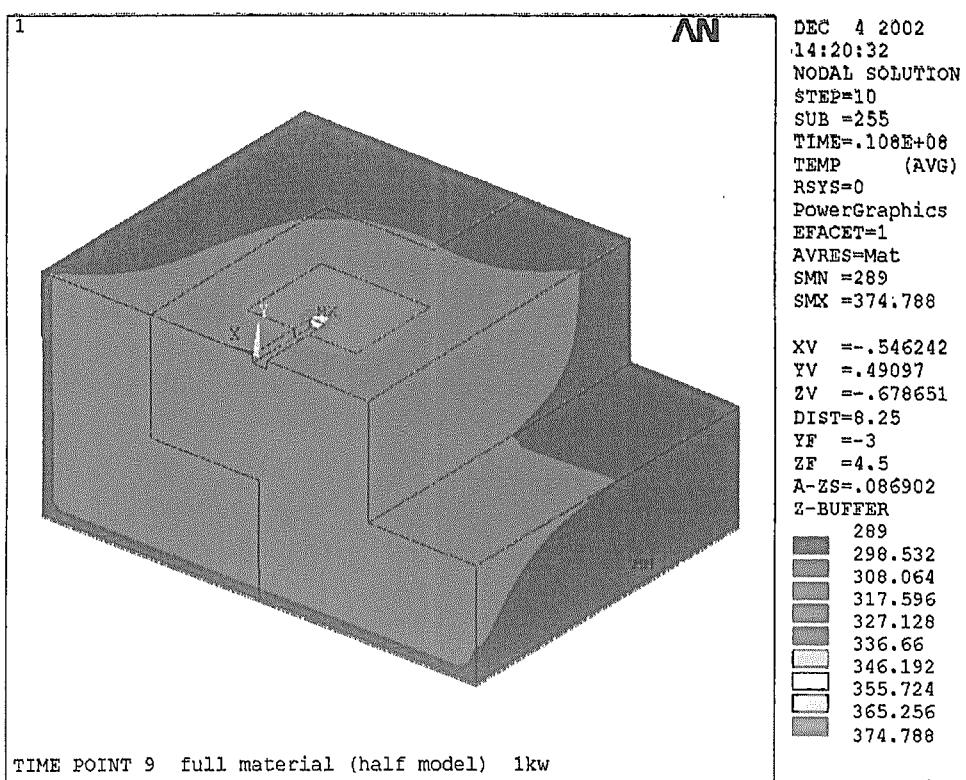


図3.17 TIME POINT 9 (125日経過時) 温度分布 モデル全体

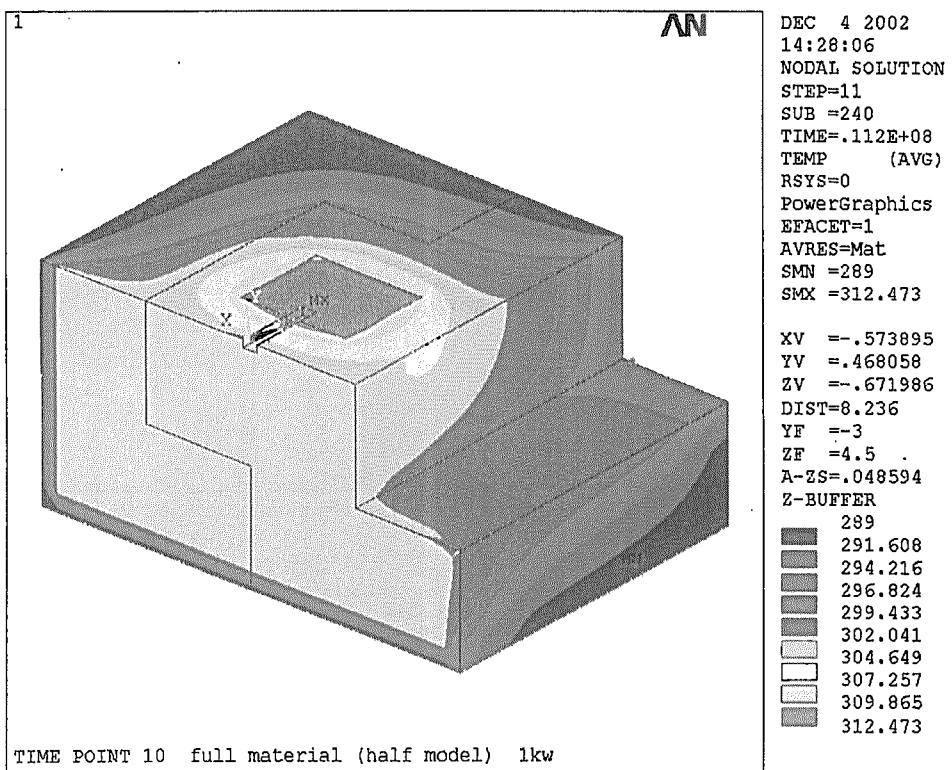


図3.18 TIME POINT 10 (130日経過時) 温度分布 モデル全体

This is a blank page.

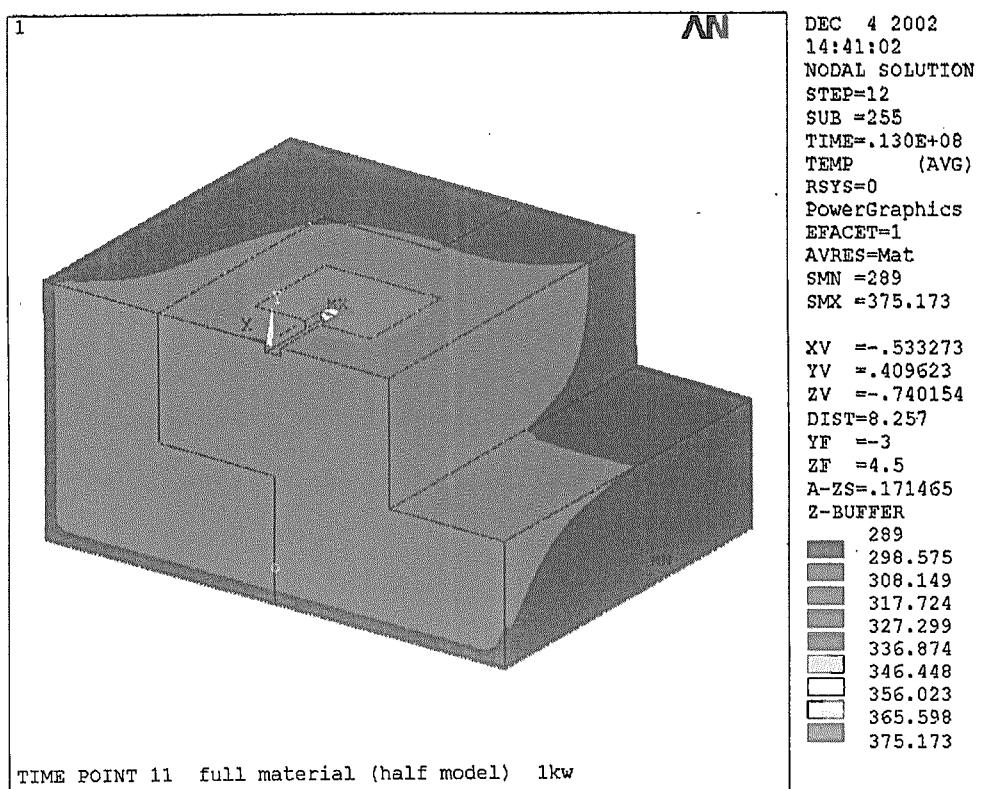


図3.19 TIME POINT 11 (151日経過時) 温度分布 モデル全体

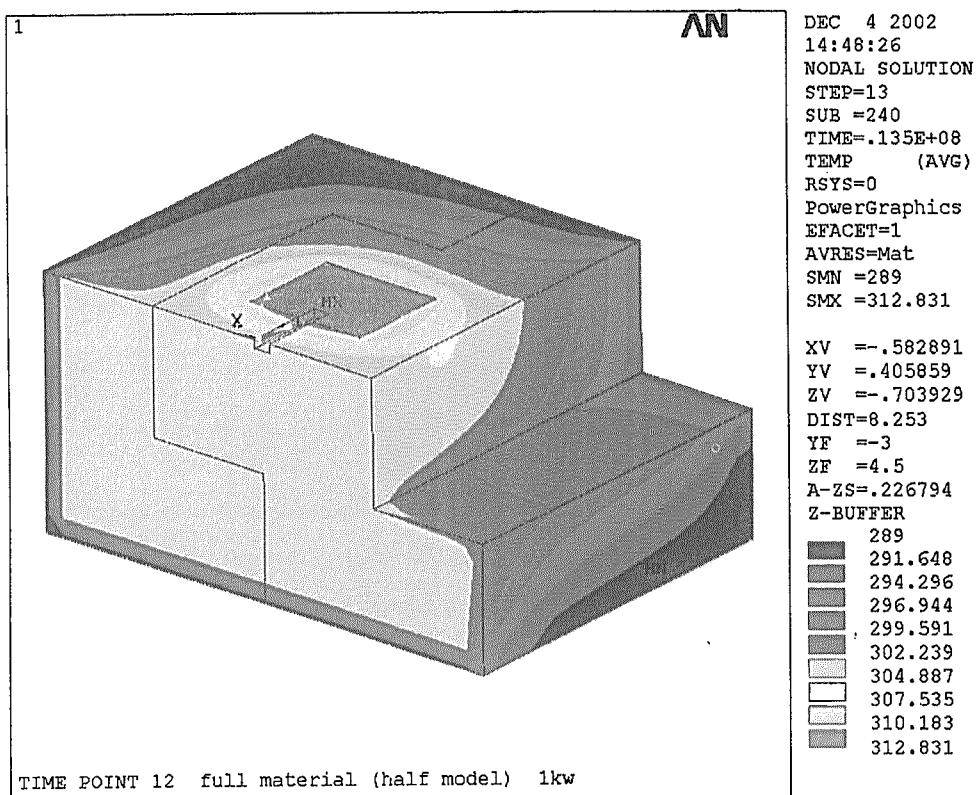


図3.20 TIME POINT 12 (156日経過時) 温度分布 モデル全体

This is a blank page.

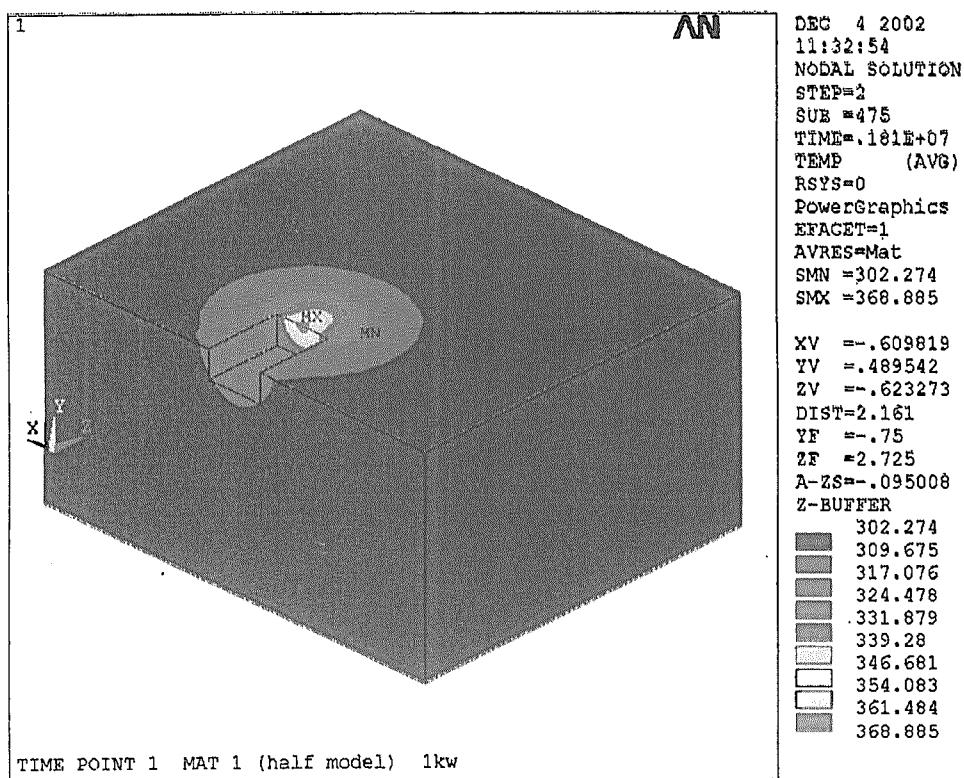


図3.21 TIME POINT 1 (21日経過時) 温度分布 鉄部

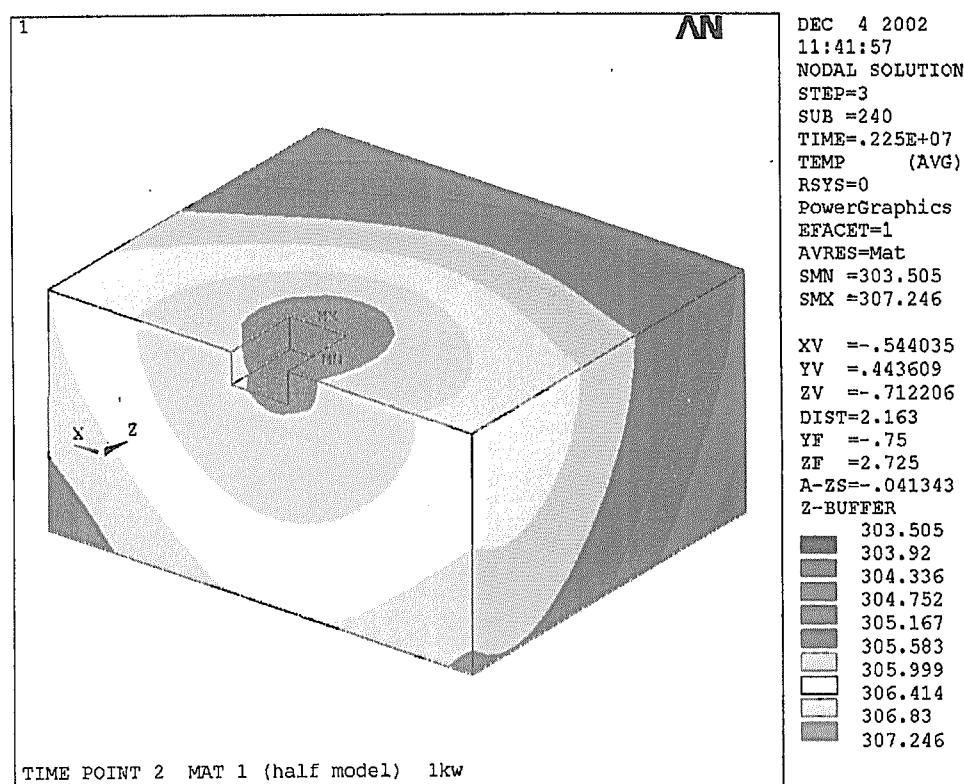


図3.22 TIME POINT 2 (26日経過時) 温度分布 鉄部

This is a blank page.

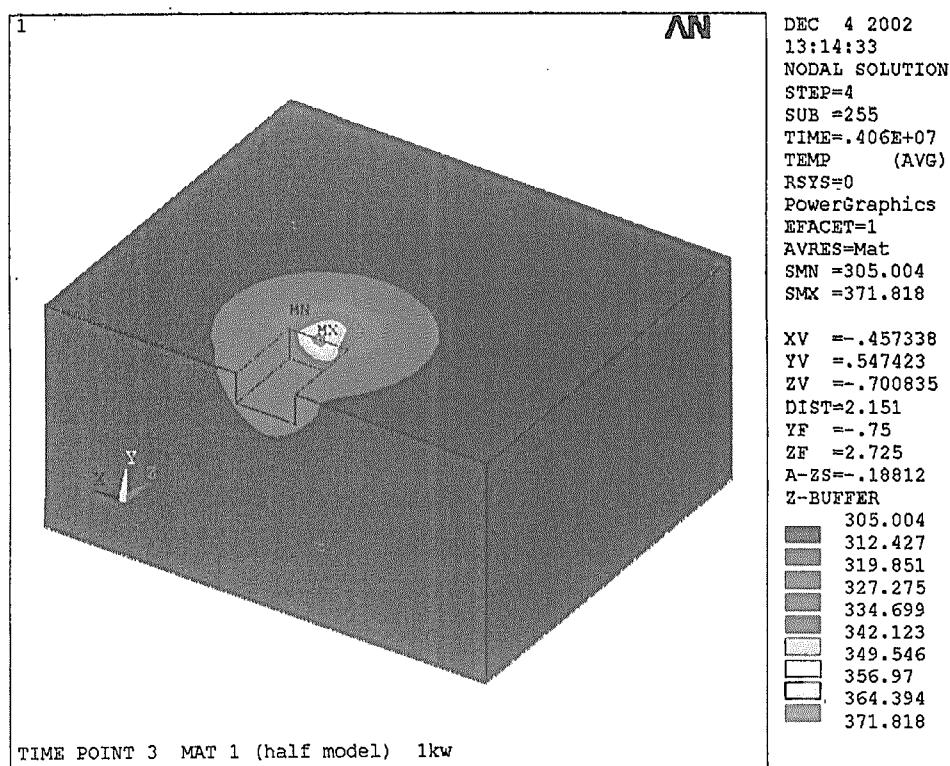


図3.23 TIME POINT 3 (47日経過時) 温度分布 鉄部

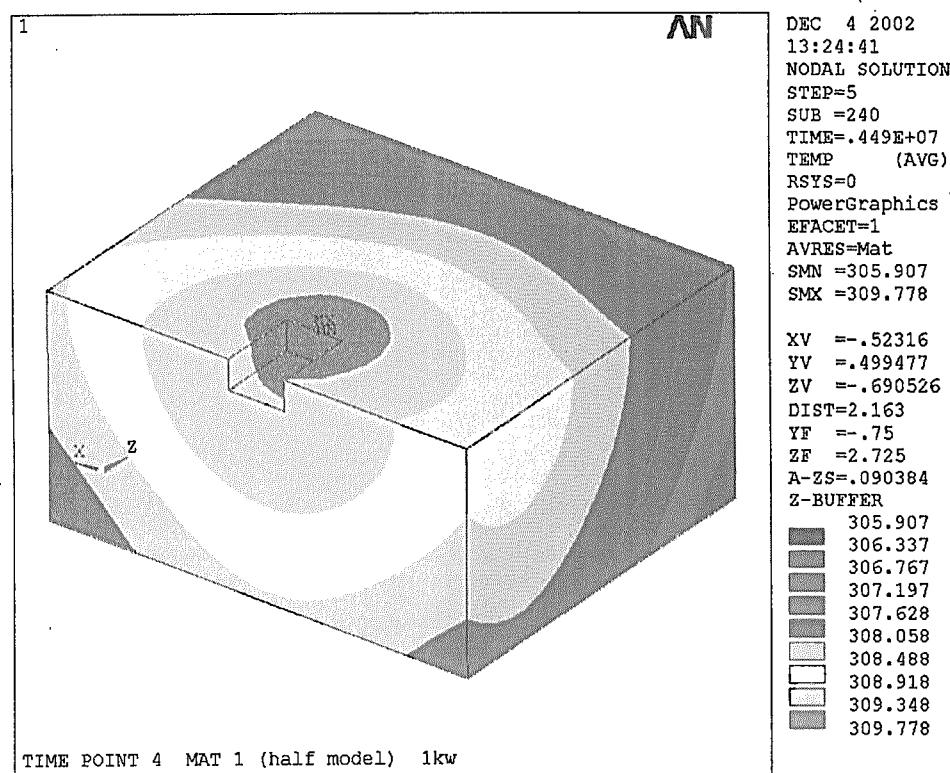


図3.24 TIME POINT 4 (52日経過時) 温度分布 鉄部

This is a blank page.

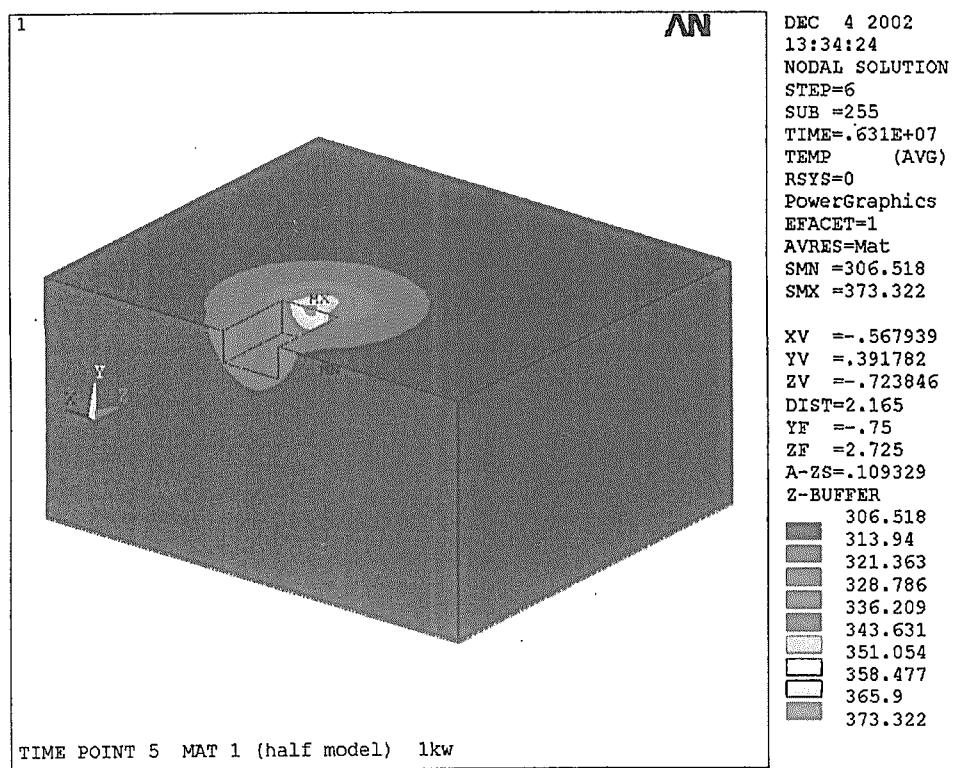


図3.25 TIME POINT 5 (73日経過時) 温度分布 鉄部

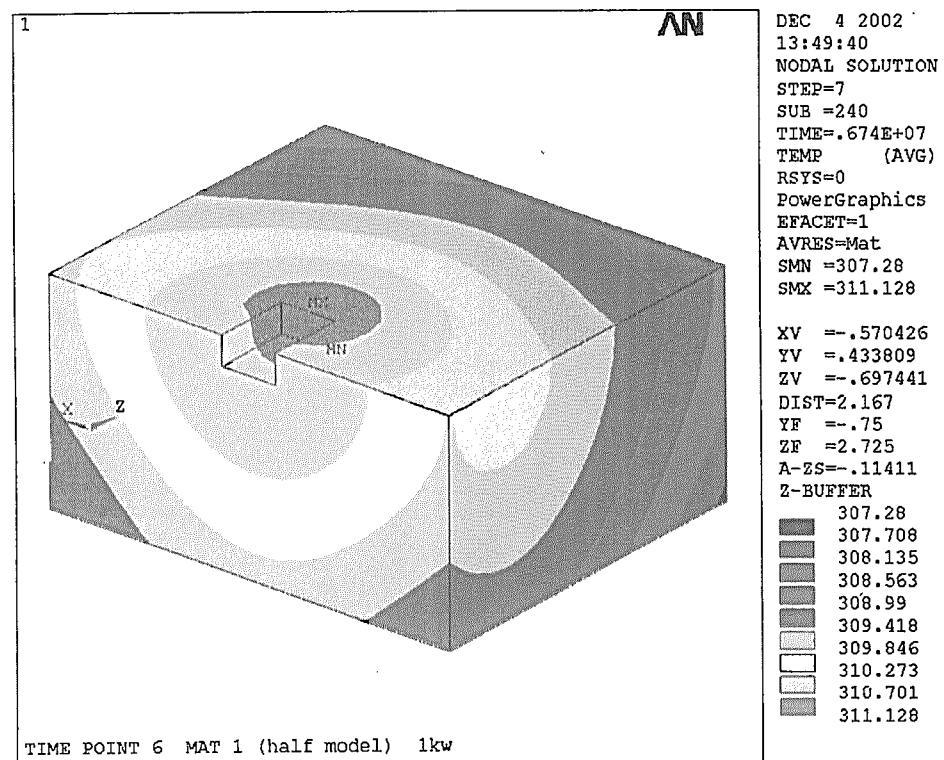


図3.26 TIME POINT 6 (78日経過時) 温度分布 鉄部

This is a blank page.

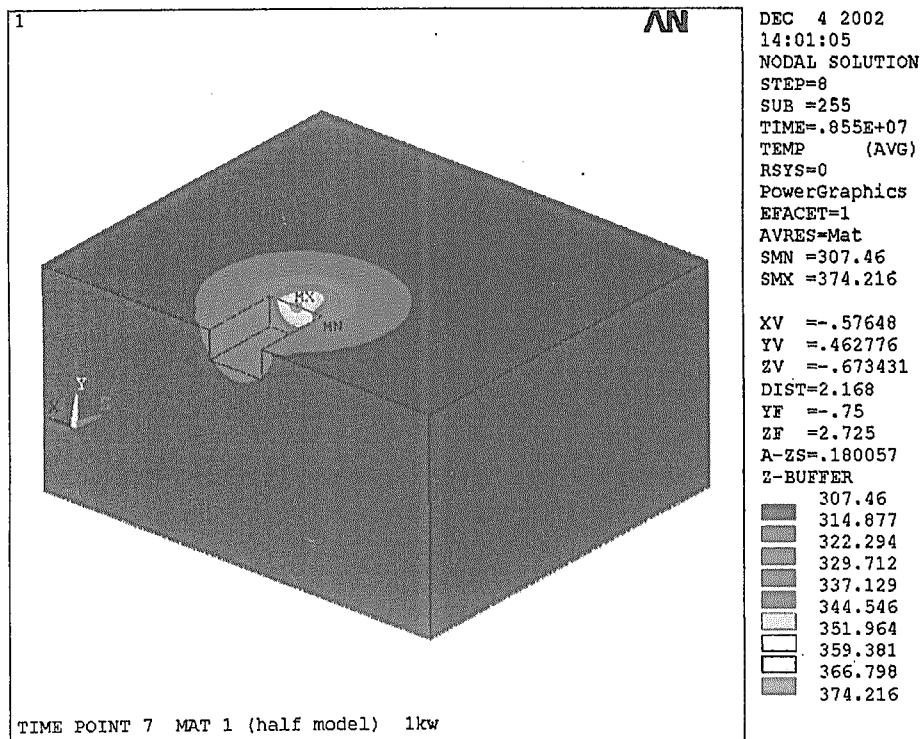


図3.27 TIME POINT 7 (99日経過時) 温度分布 鉄部

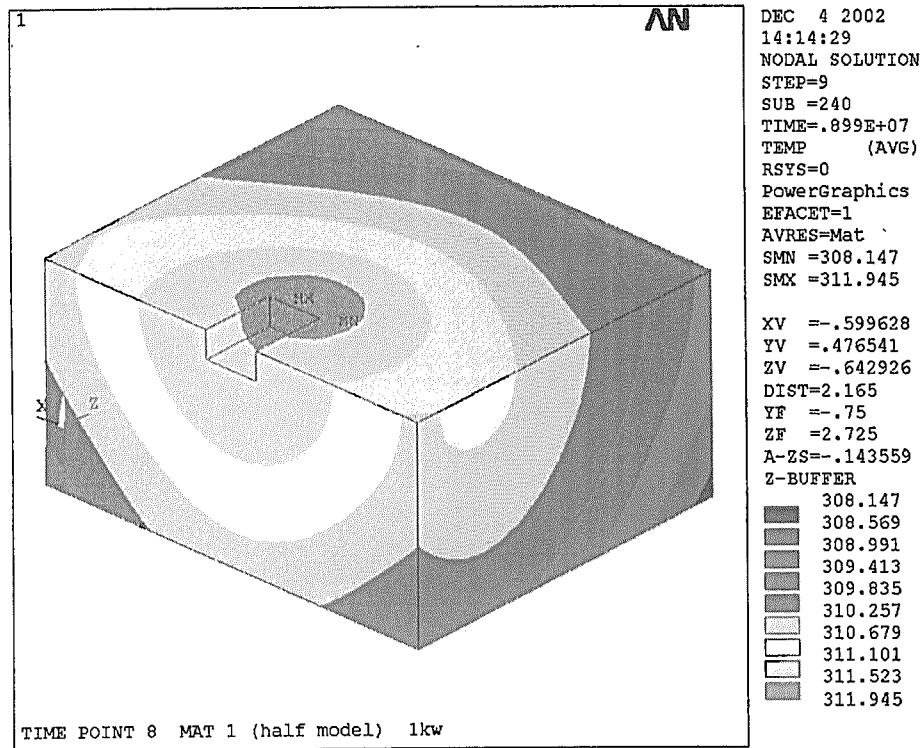


図3.28 TIME POINT 8 (104日経過時) 温度分布 鉄部

This is a blank page.

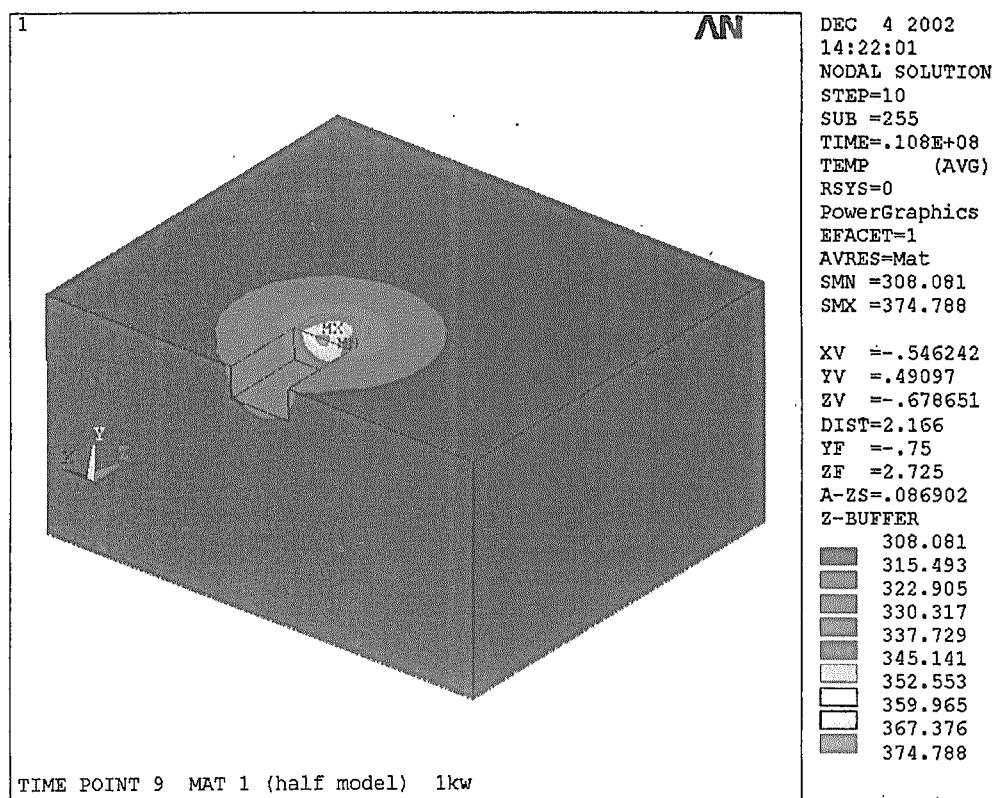


図3.29 TIME POINT 9 (125日経過時) 温度分布 鉄部

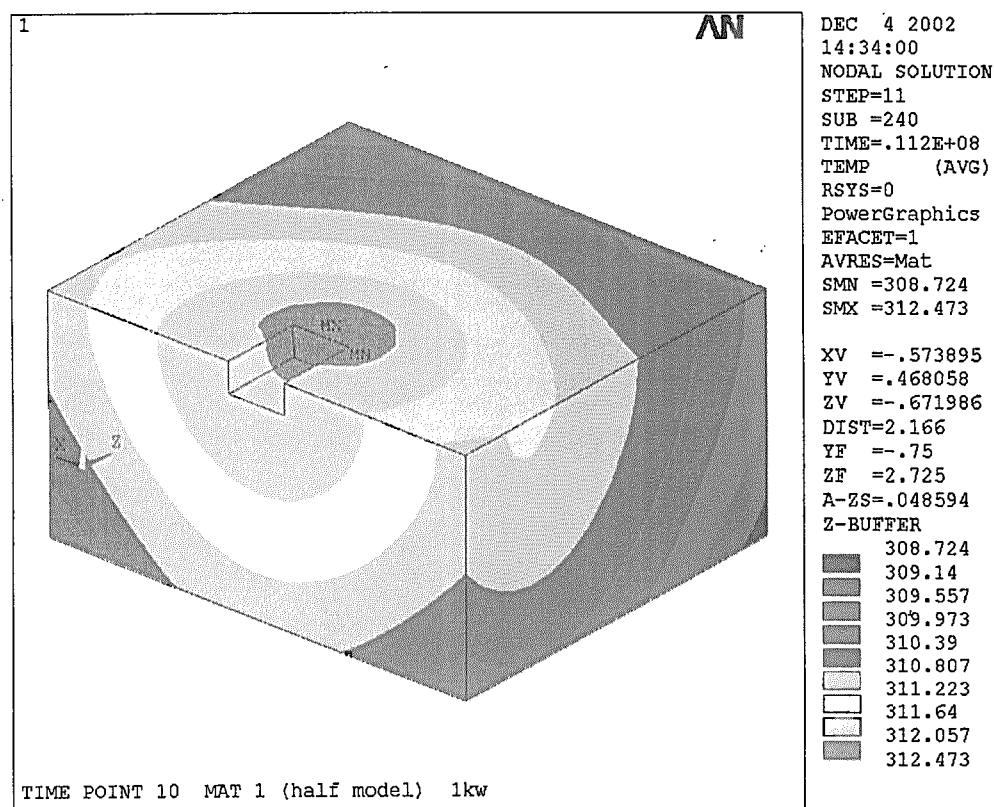


図3.30 TIME POINT 10 (130日経過時) 温度分布 鉄部

This is a blank page.

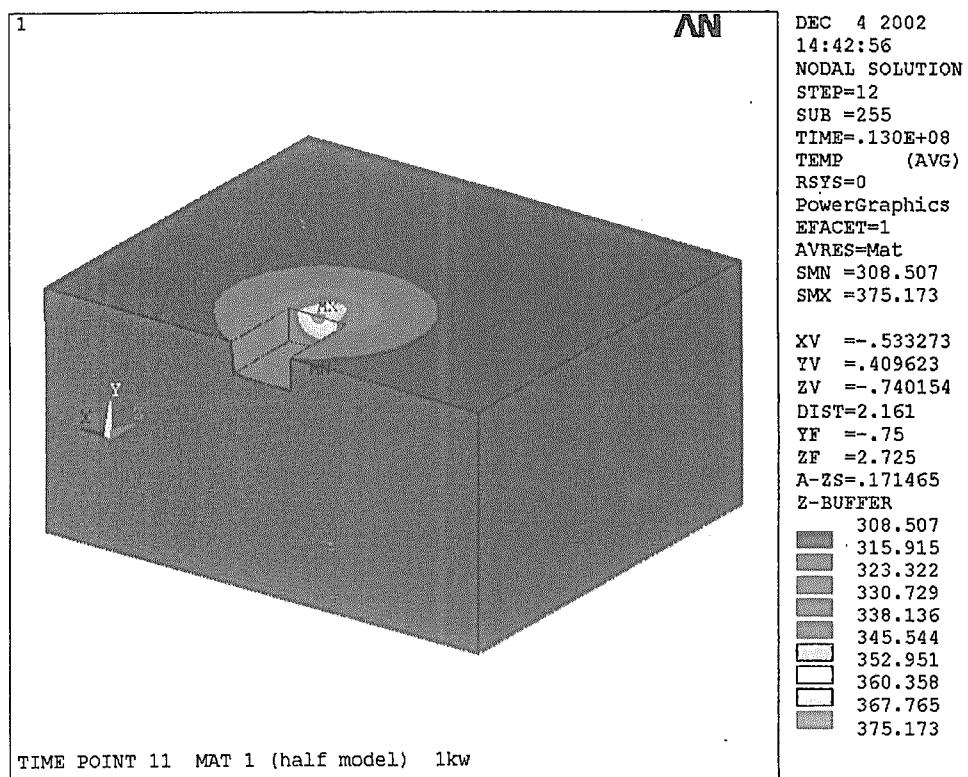


図3.31 TIME POINT 11 (151日経過時) 温度分布 鉄部

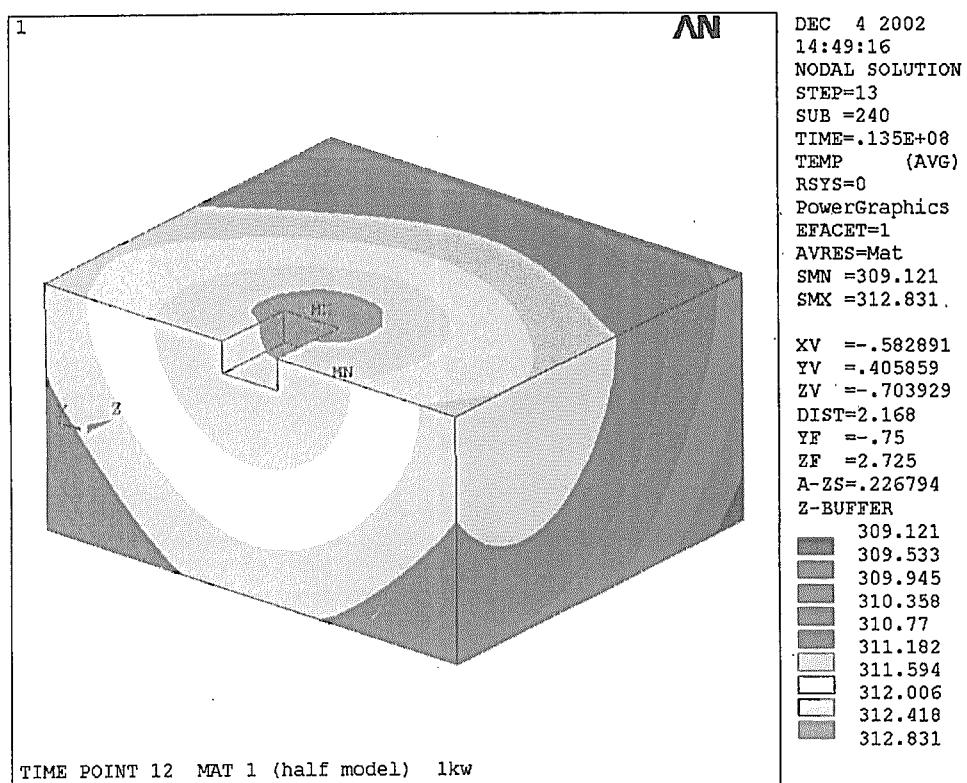


図3.32 TIME POINT 12 (156日経過時) 温度分布 鉄部

This is a blank page.

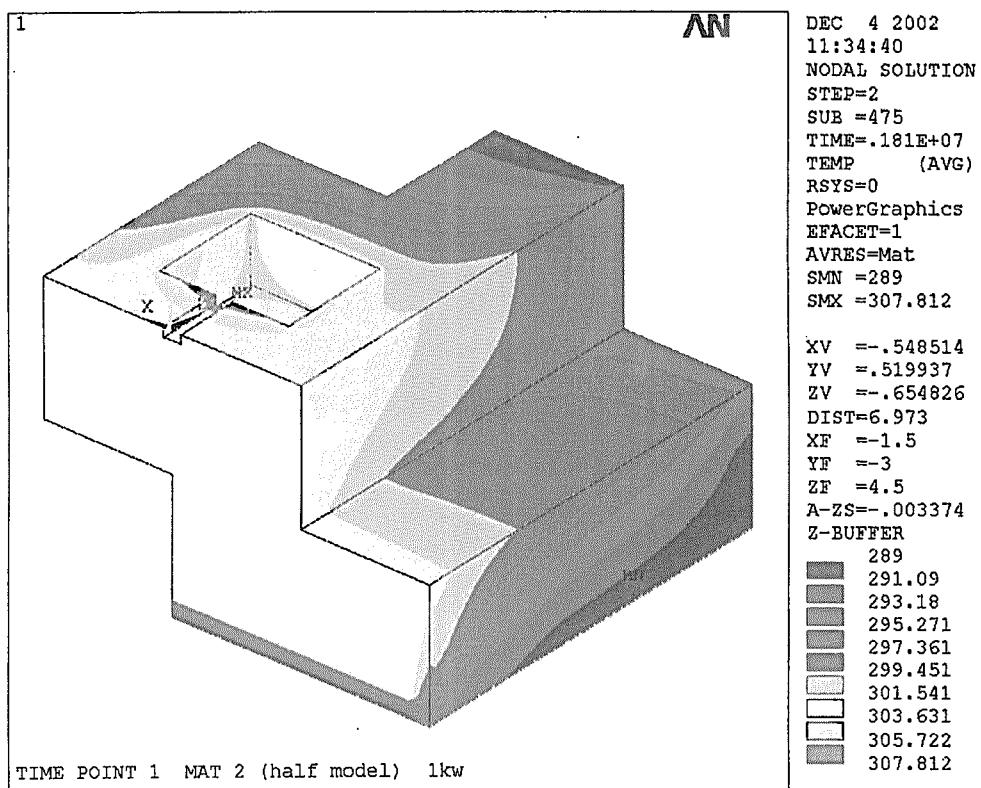


図3.33 TIME POINT 1 (21日経過時) 温度分布 コンクリート部

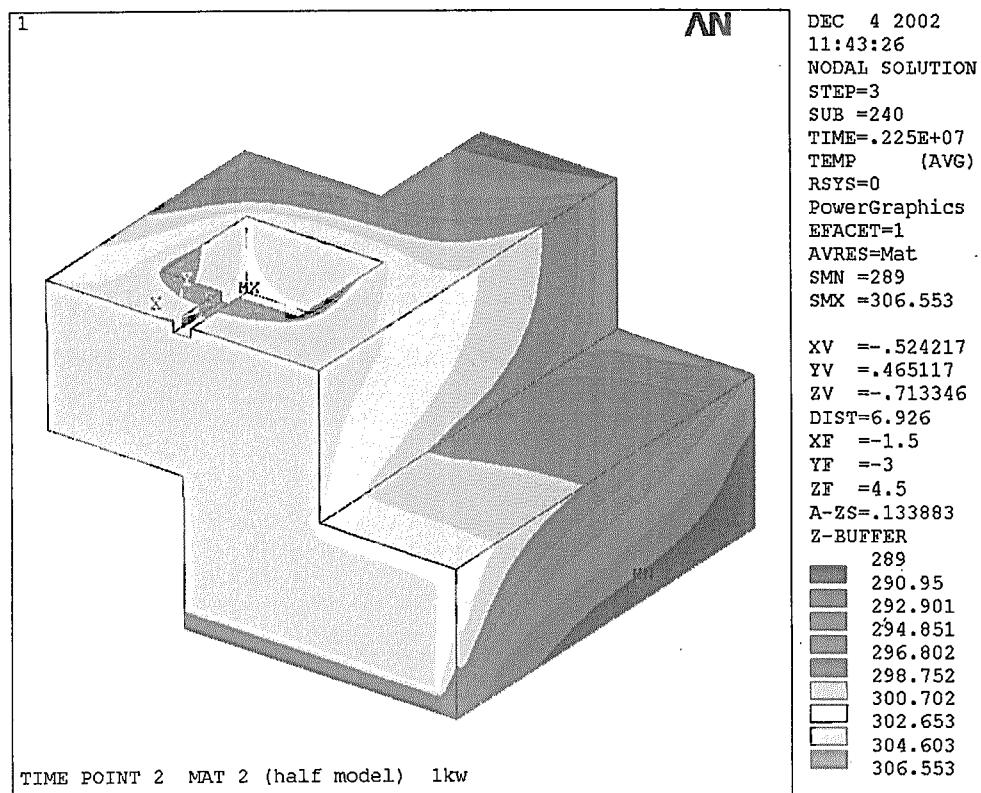


図3.34 TIME POINT 2 (26日経過時) 温度分布 コンクリート部

---

This is a blank page.

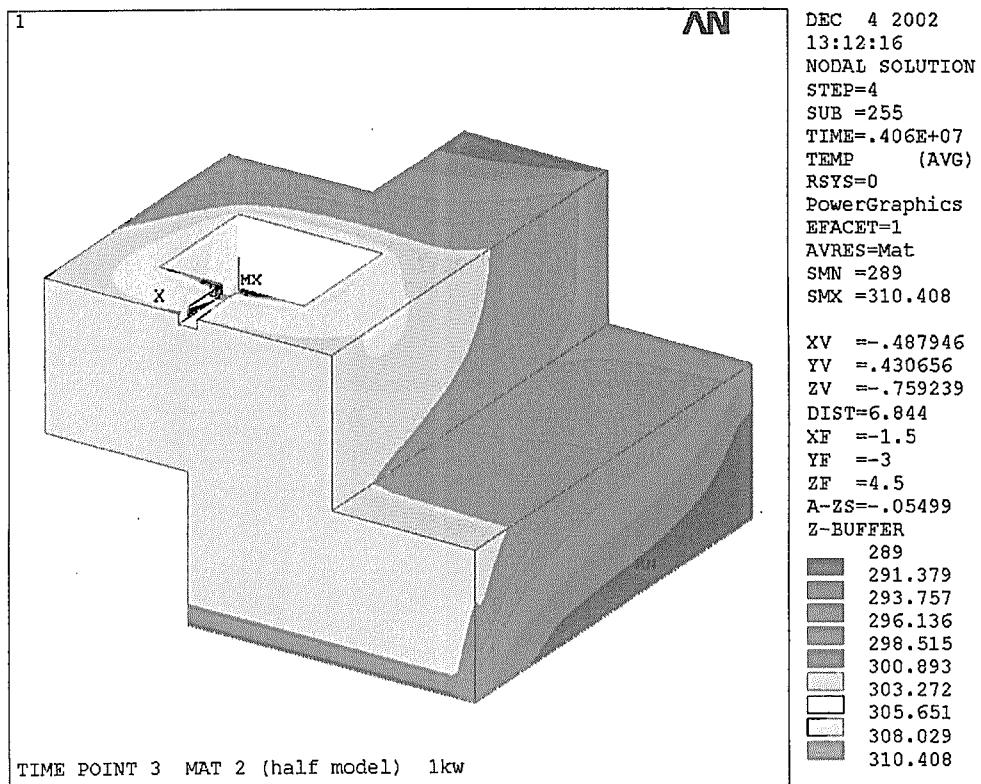


図3.35 TIME POINT 3 (47日経過時) 温度分布 コンクリート部

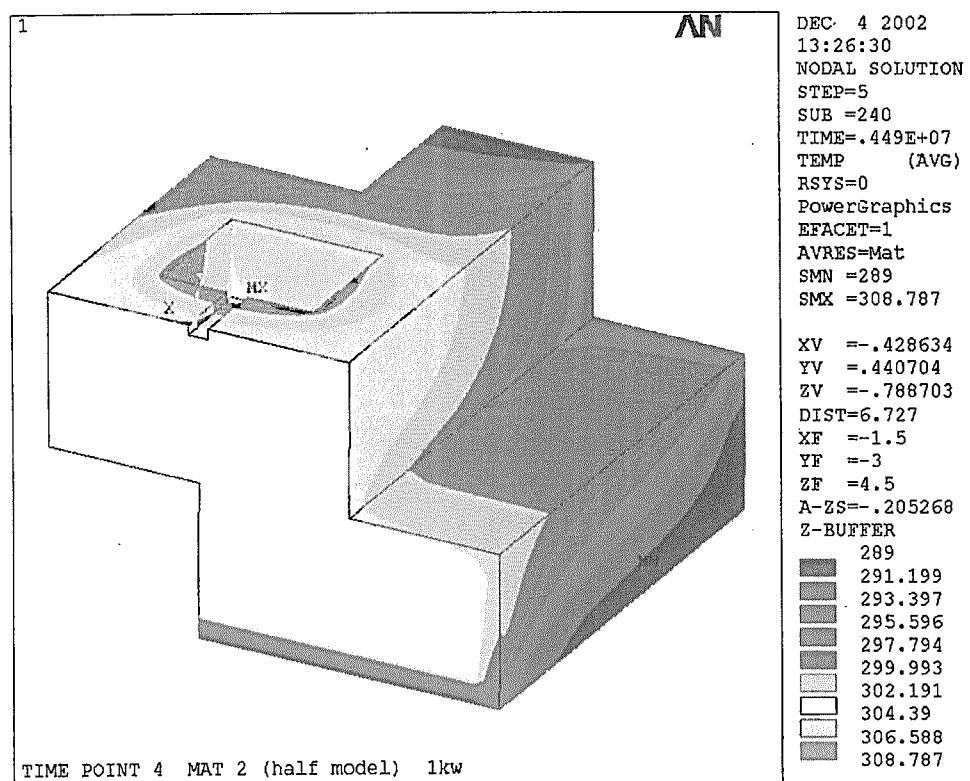


図3.36 TIME POINT 4 (52日経過時) 温度分布 コンクリート部

This is a blank page.

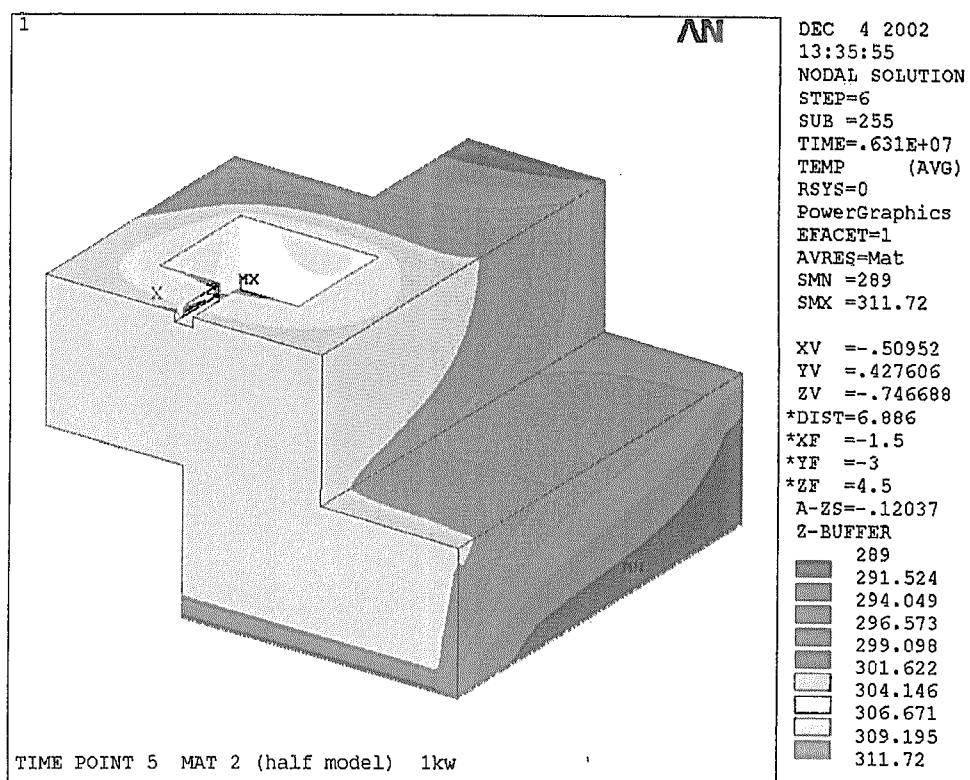


図3.37 TIME POINT 5 (73日経過時) 温度分布 コンクリート部

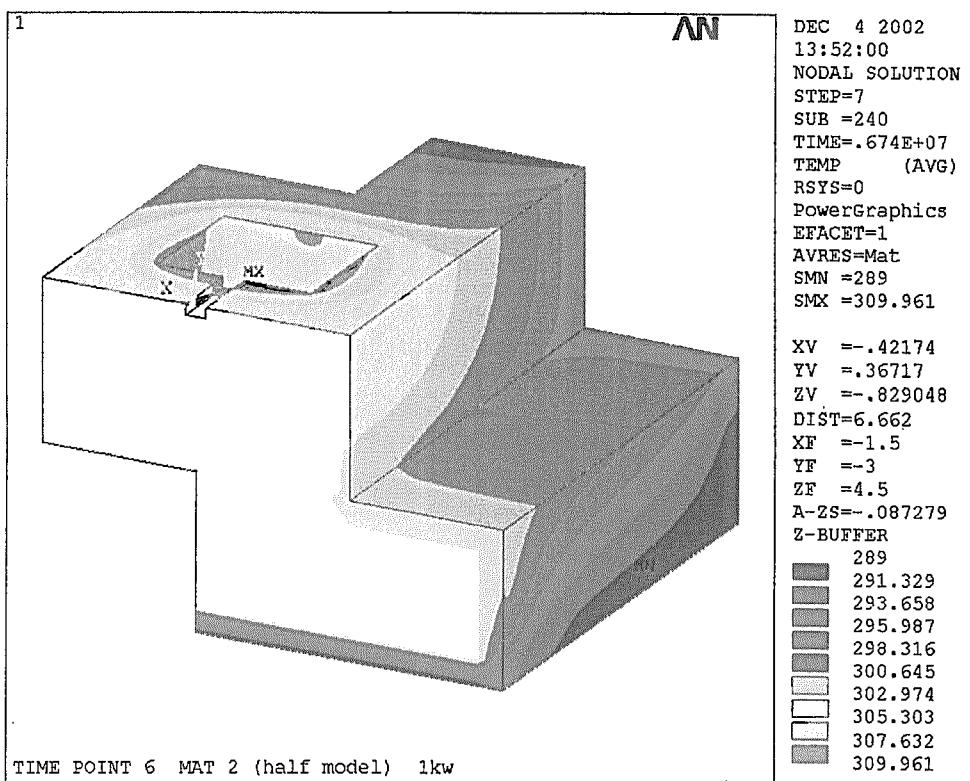


図3.38 TIME POINT 6 (78日経過時) 温度分布 コンクリート部

This is a blank page.

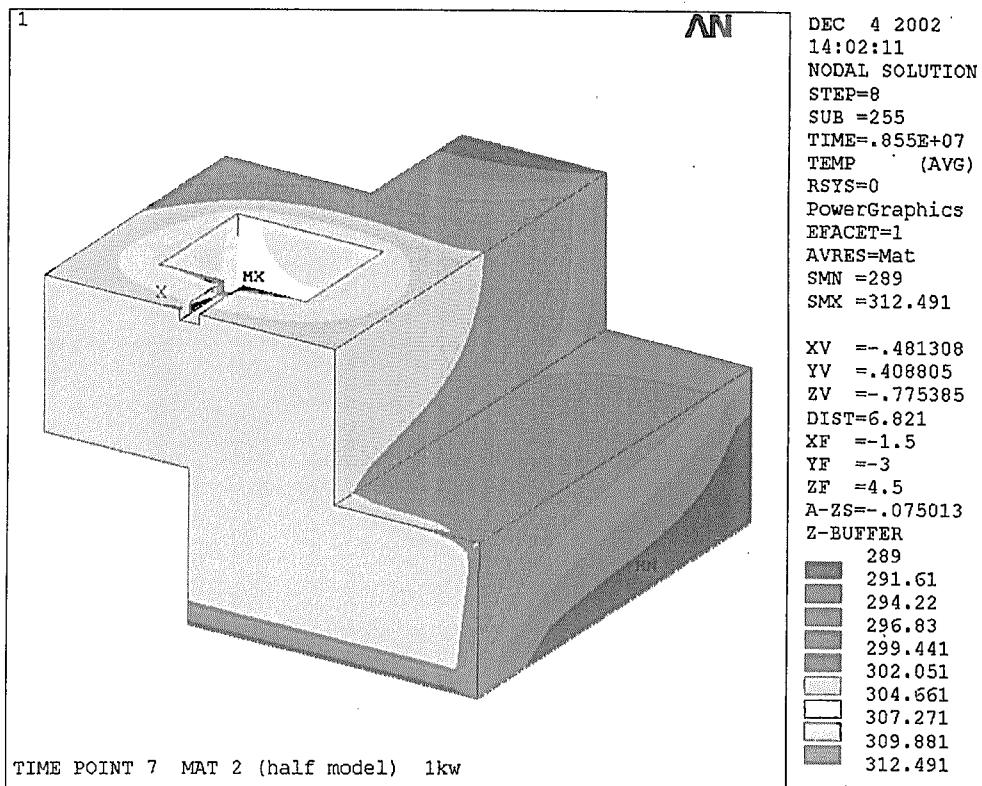


図3.39 TIME POINT 7 (99日経過時) 温度分布 コンクリート部

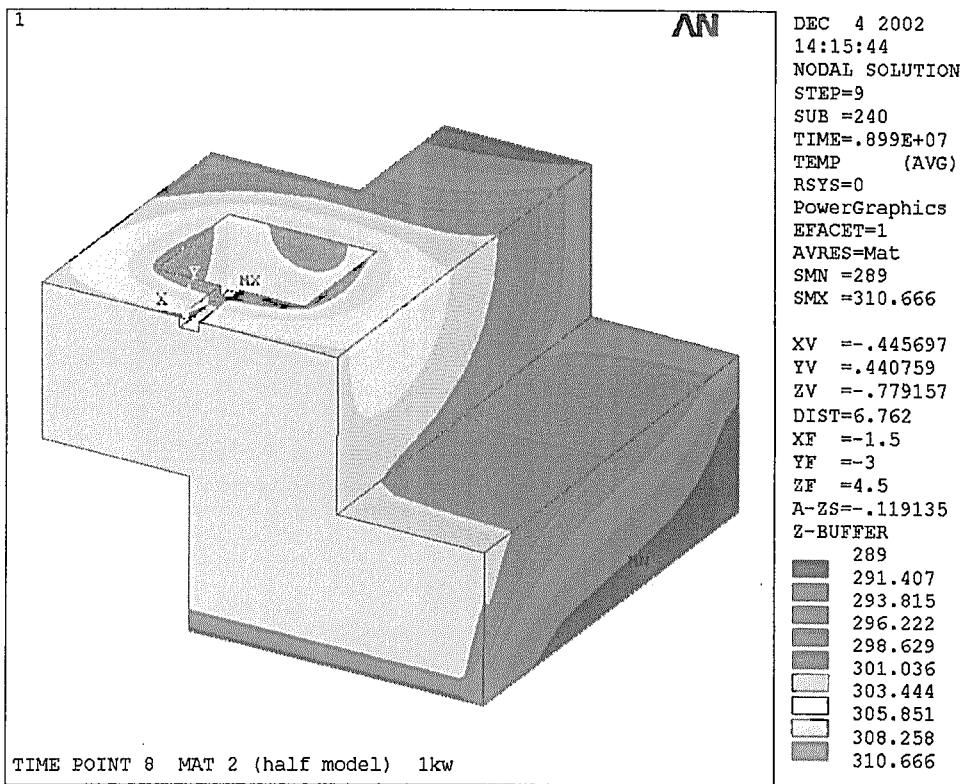


図3.40 TIME POINT 8 (104日経過時) 温度分布 コンクリート部

This is a blank page.

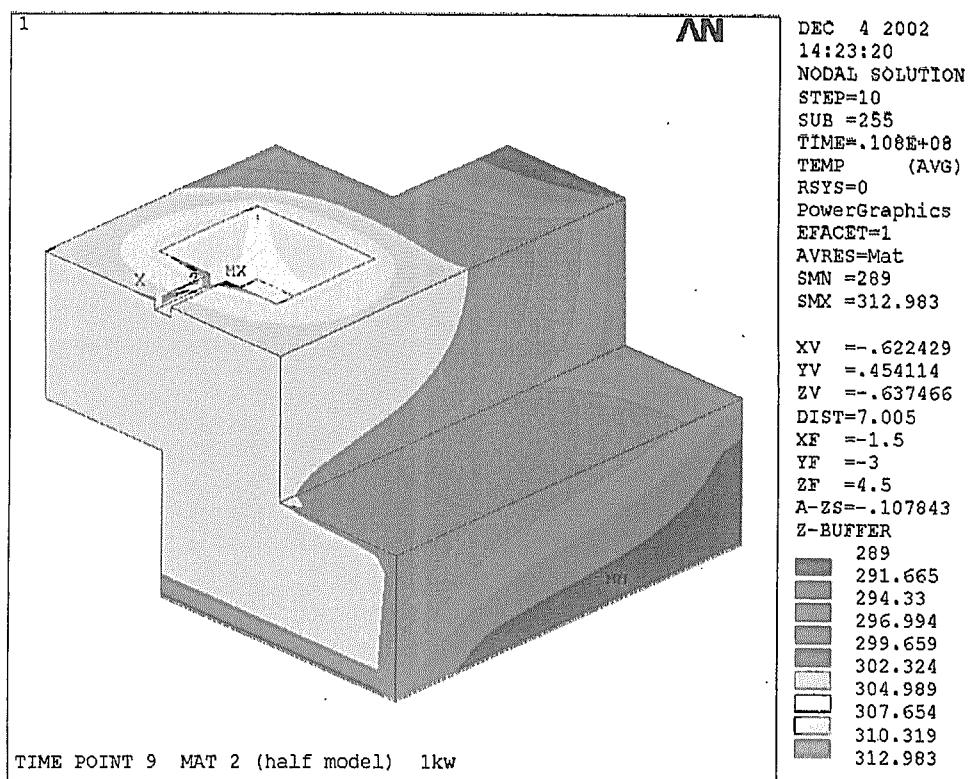


図3.41 TIME POINT 9 (125日経過時) 温度分布 コンクリート部

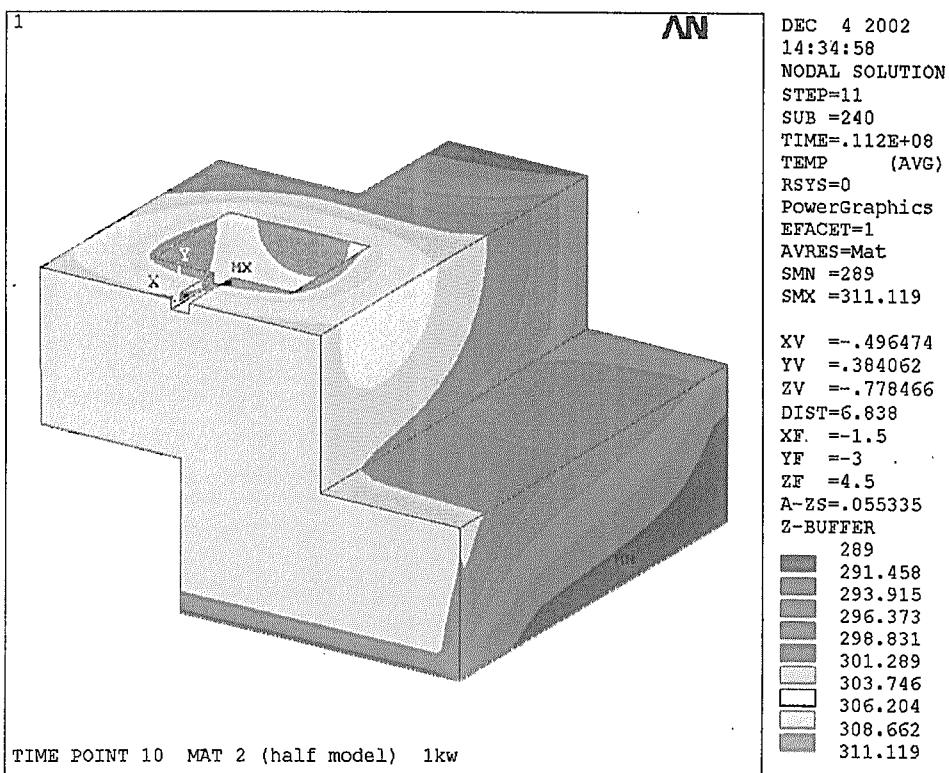


図3.42 TIME POINT 10 (130日経過時) 温度分布 コンクリート部

This is a blank page.

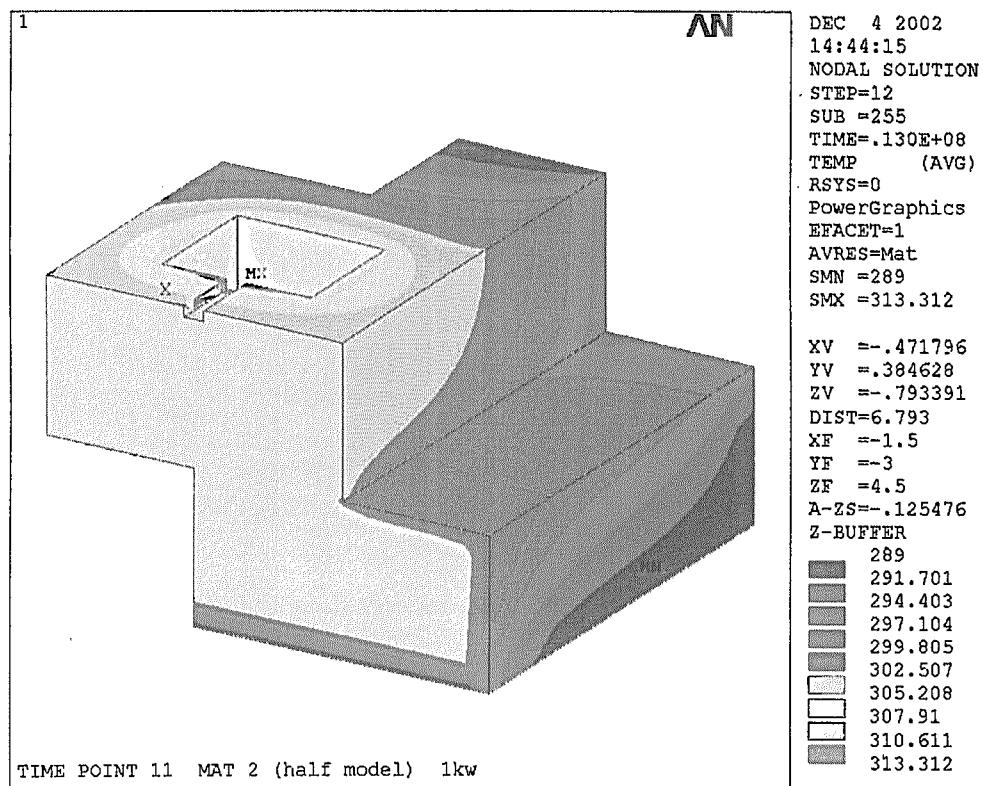


図3.43 TIME POINT 11 (151日経過時) 温度分布 コンクリート部

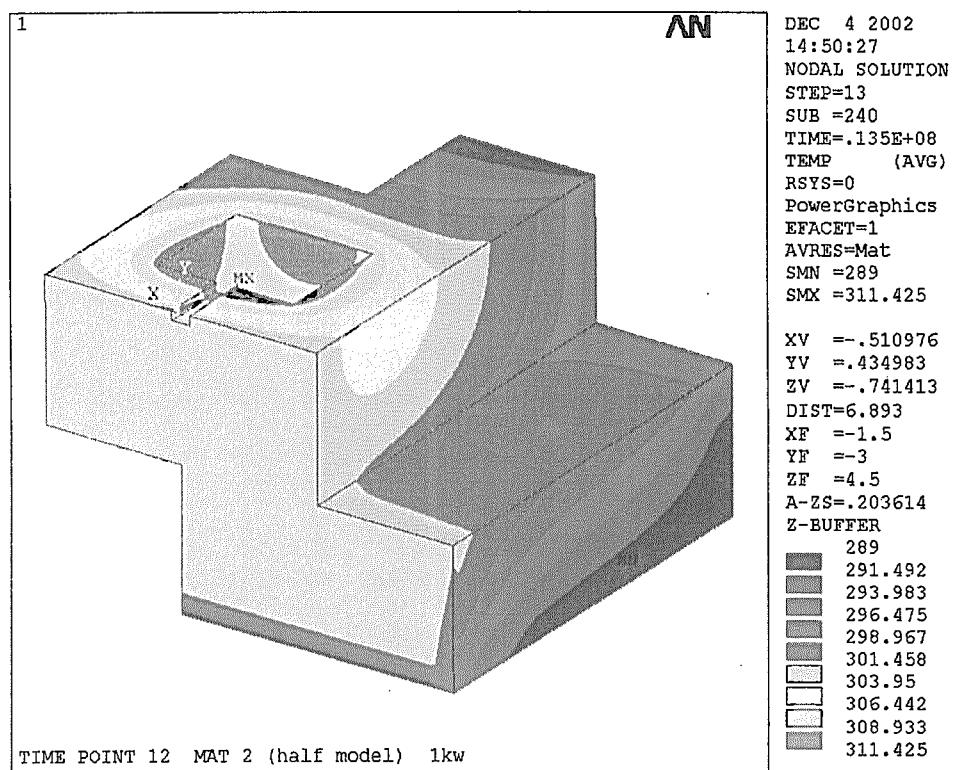


図3.44 TIME POINT 12 (156日経過時) 温度分布 コンクリート部

This is a blank page.

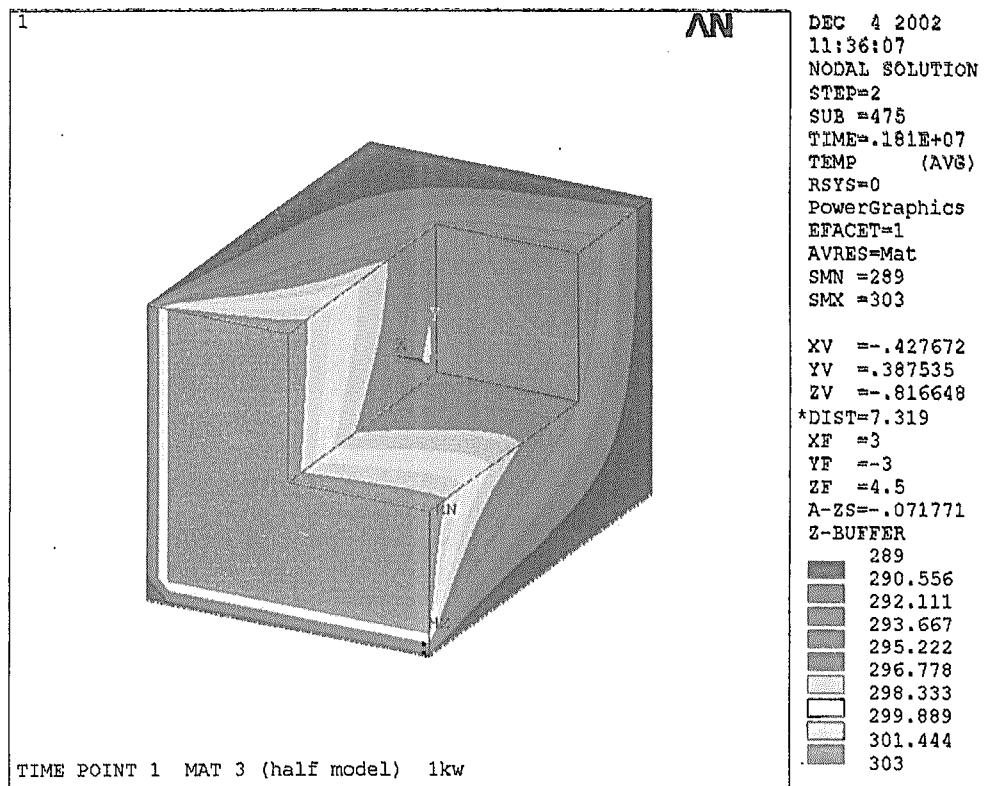


図3.45 TIME POINT 1 (21日経過時) 温度分布 砂部

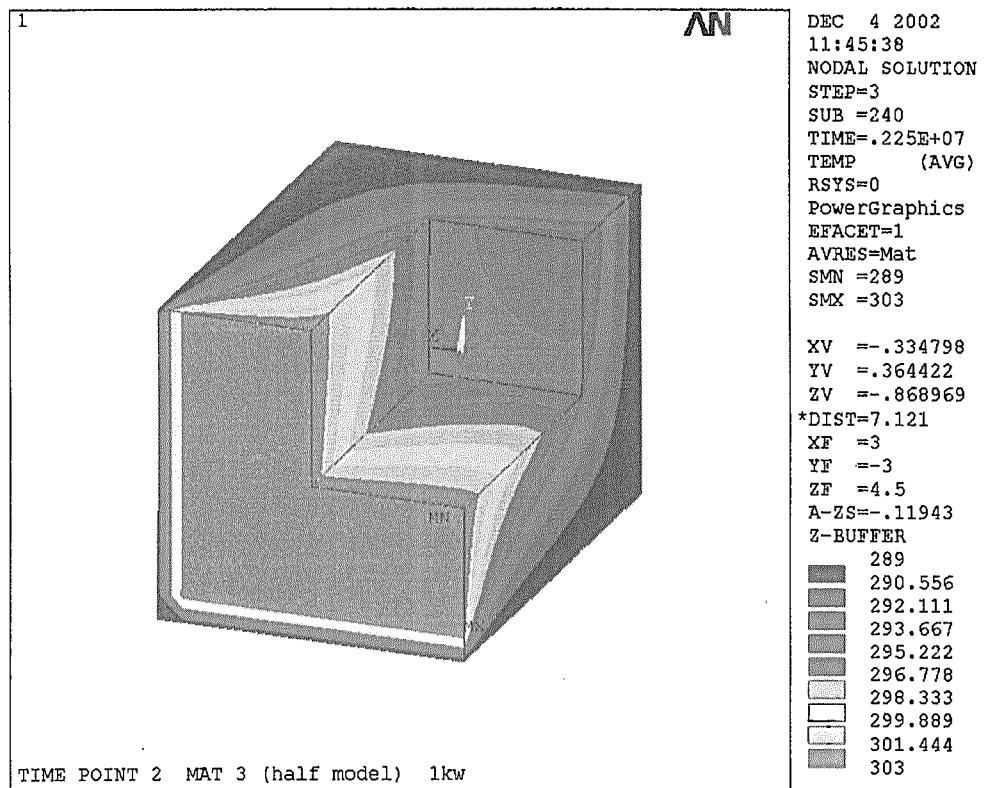


図3.46 TIME POINT 2 (26日経過時) 温度分布 砂部

This is a blank page.

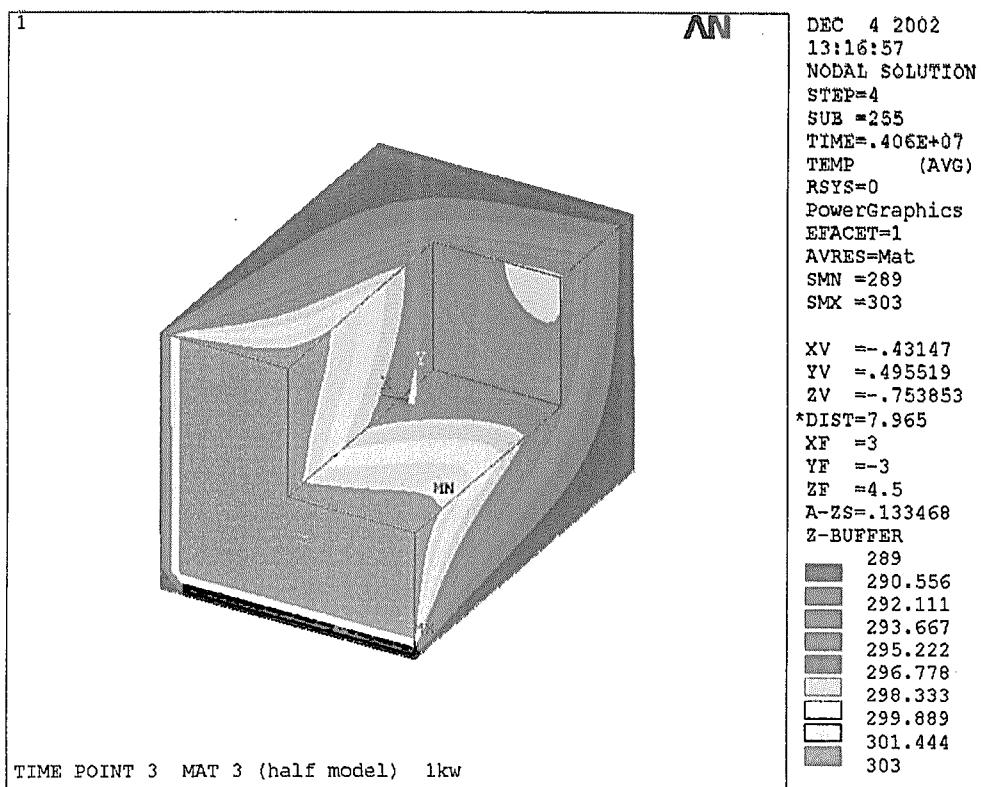


図3.47 TIME POINT 3 (47日経過時) 温度分布 砂部

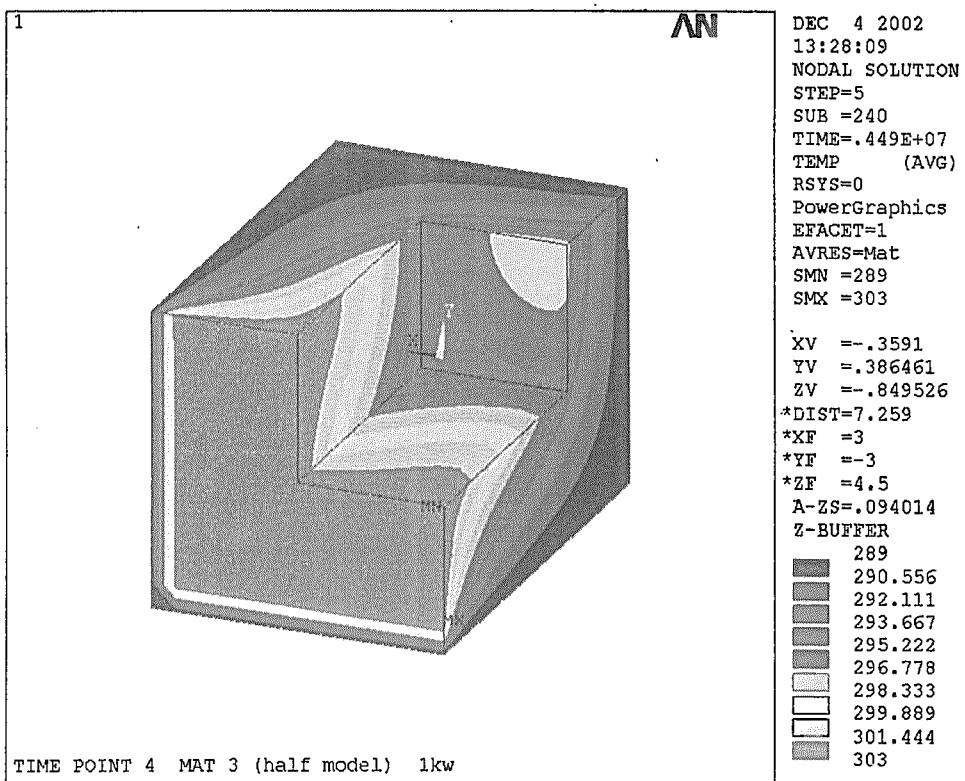


図3.48 TIME POINT 4 (52日経過時) 温度分布 砂部

This is a blank page.

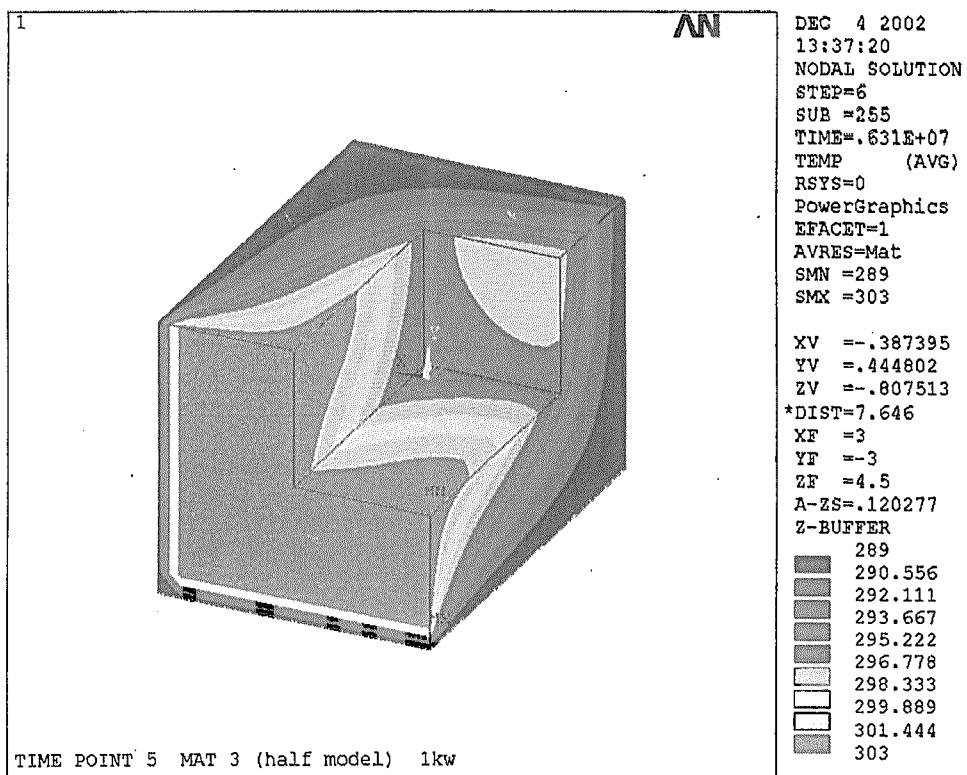


図3.49 TIME POINT 5 (73日経過時) 温度分布 砂部

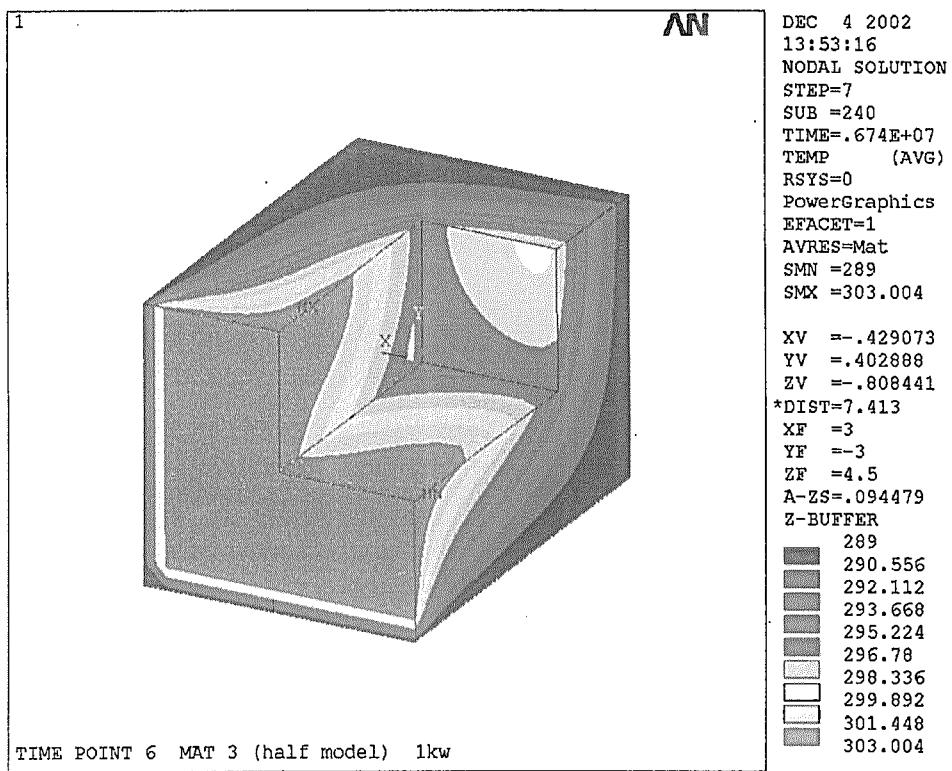


図3.50 TIME POINT 6 (78日経過時) 温度分布 砂部

This is a blank page.

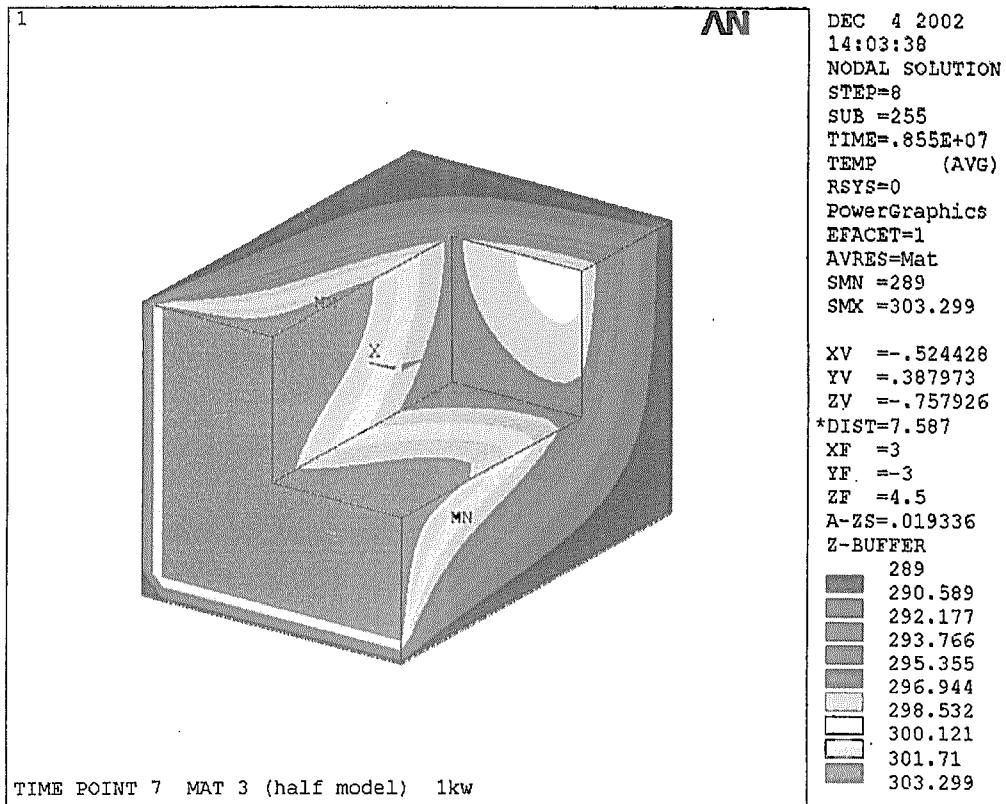


図3.51 TIME POINT 7 (99日経過時) 温度分布 砂部

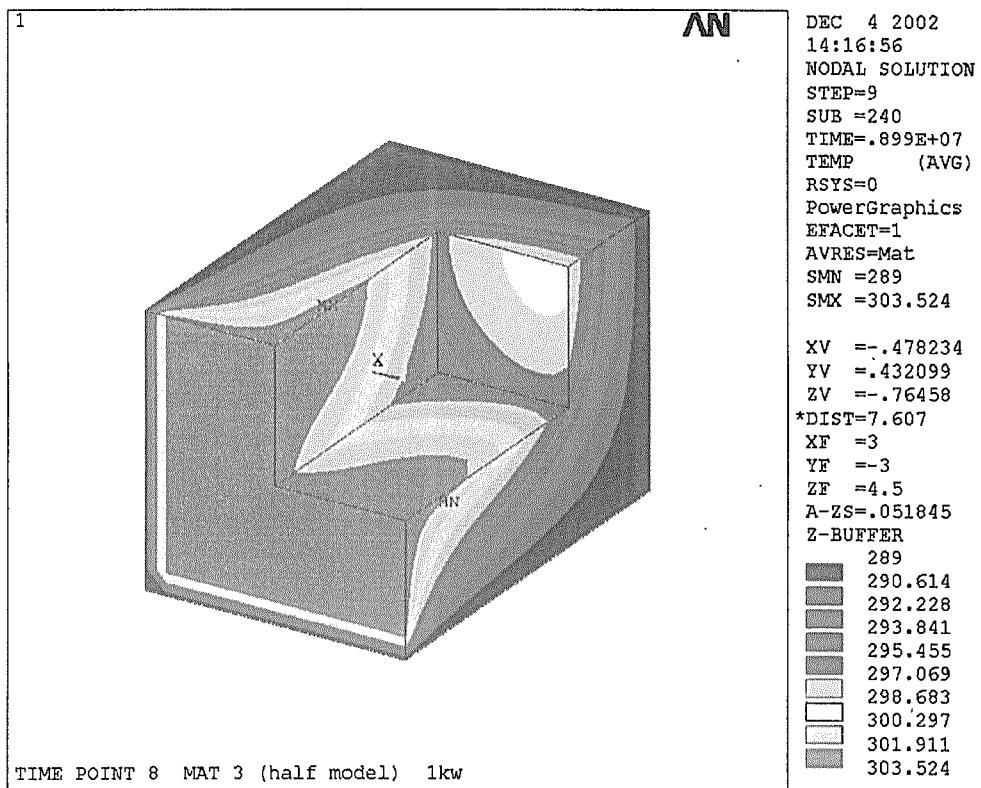


図3.52 TIME POINT 8 (104日経過時) 温度分布 砂部

This is a blank page.

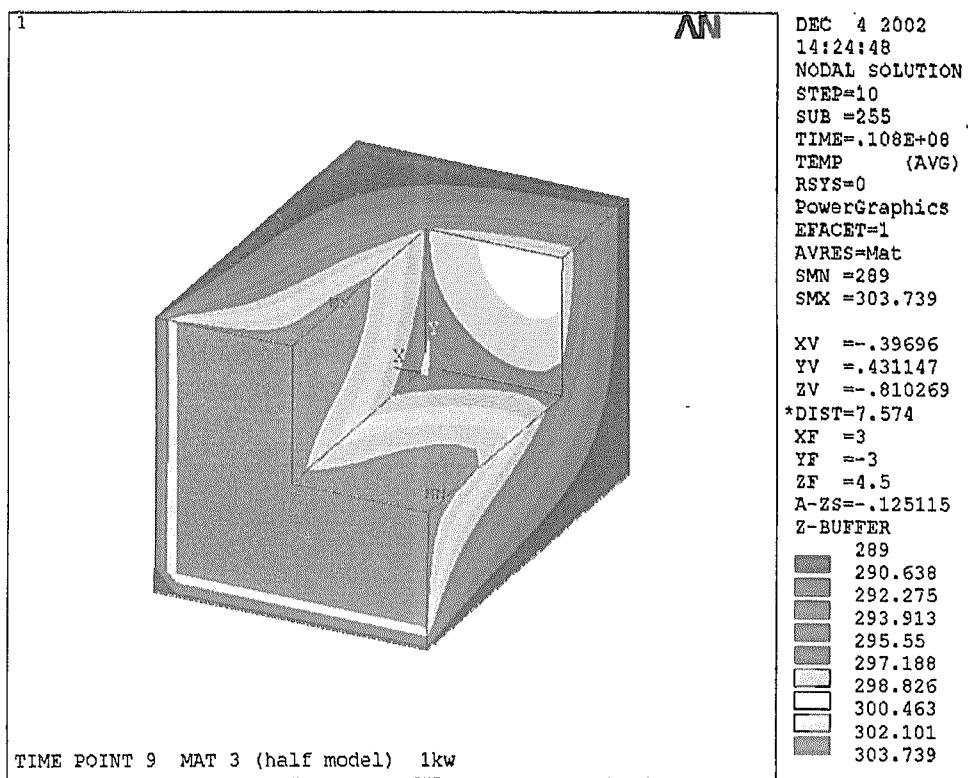


図3.53 TIME POINT 9 (125日経過時) 温度分布 砂部

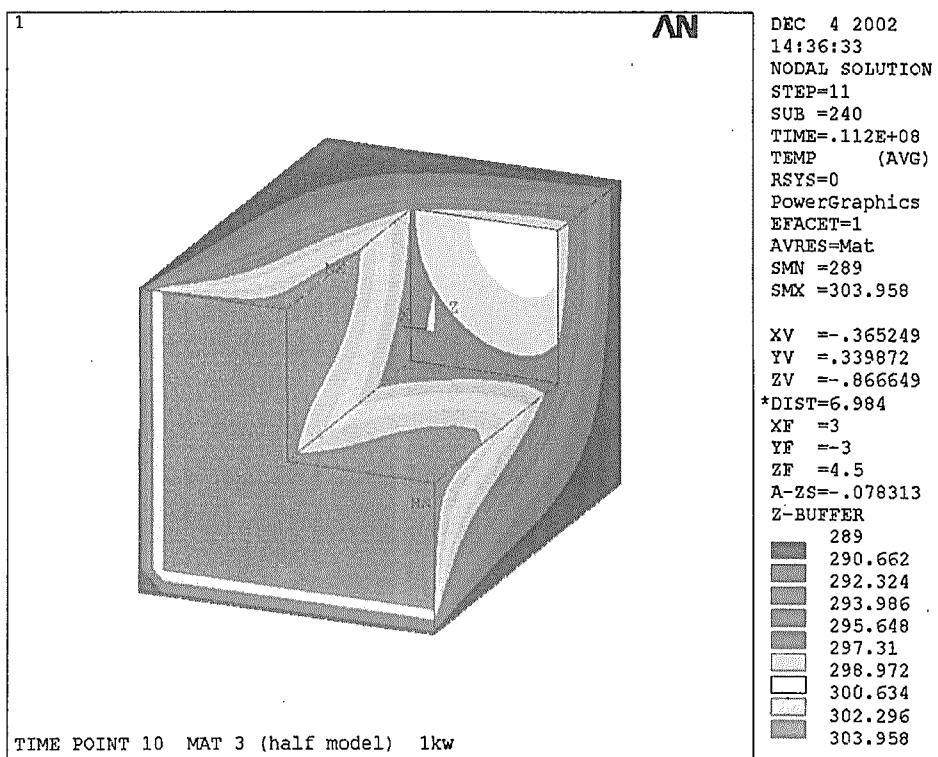


図3.54 TIME POINT 10 (130日経過時) 温度分布 砂部

This is a blank page.

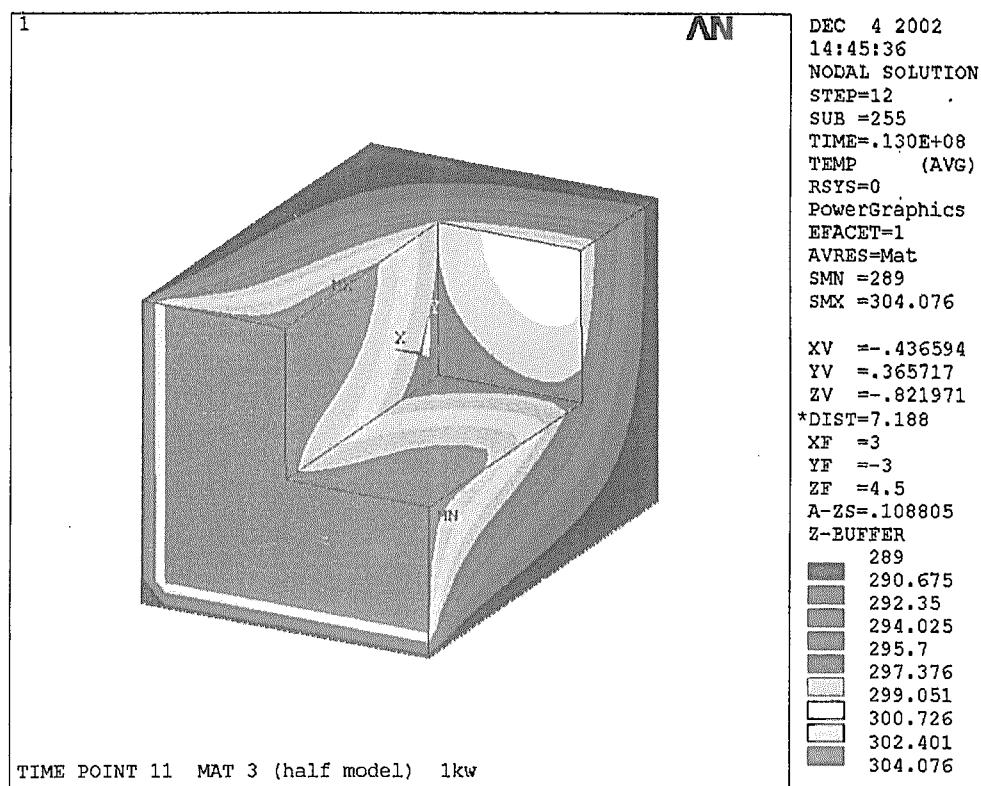


図3.55 TIME POINT 11 (151日経過時) 温度分布 砂部

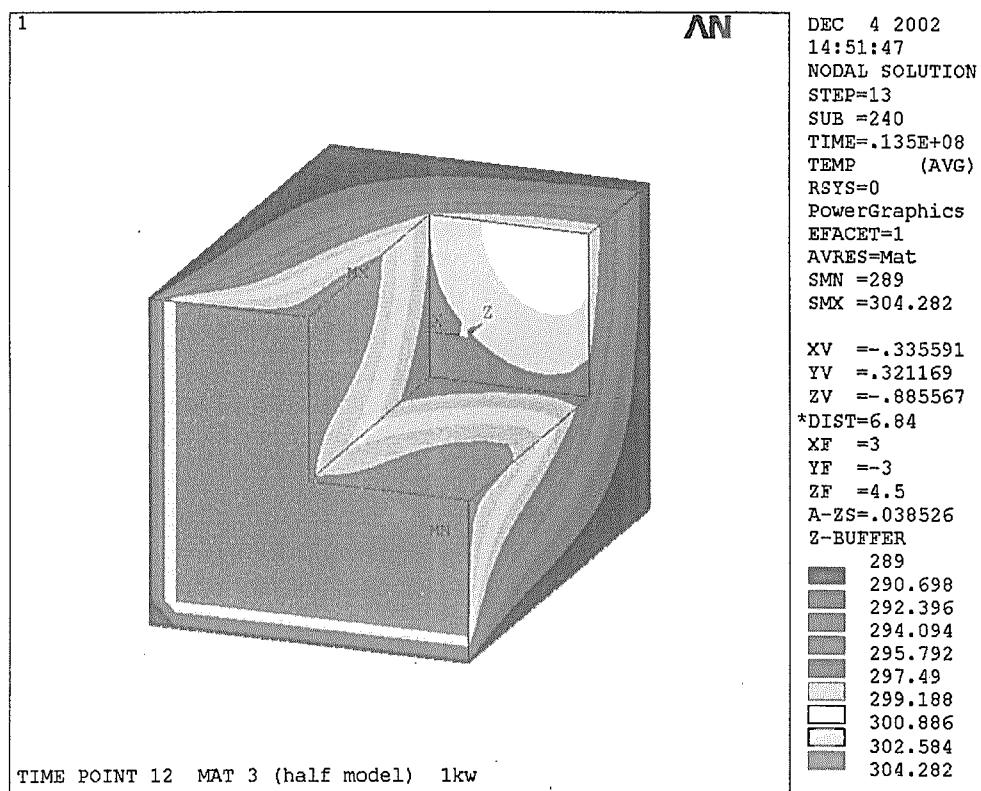


図3.56 TIME POINT 12 (156日経過時) 温度分布 砂部

This is a blank page.

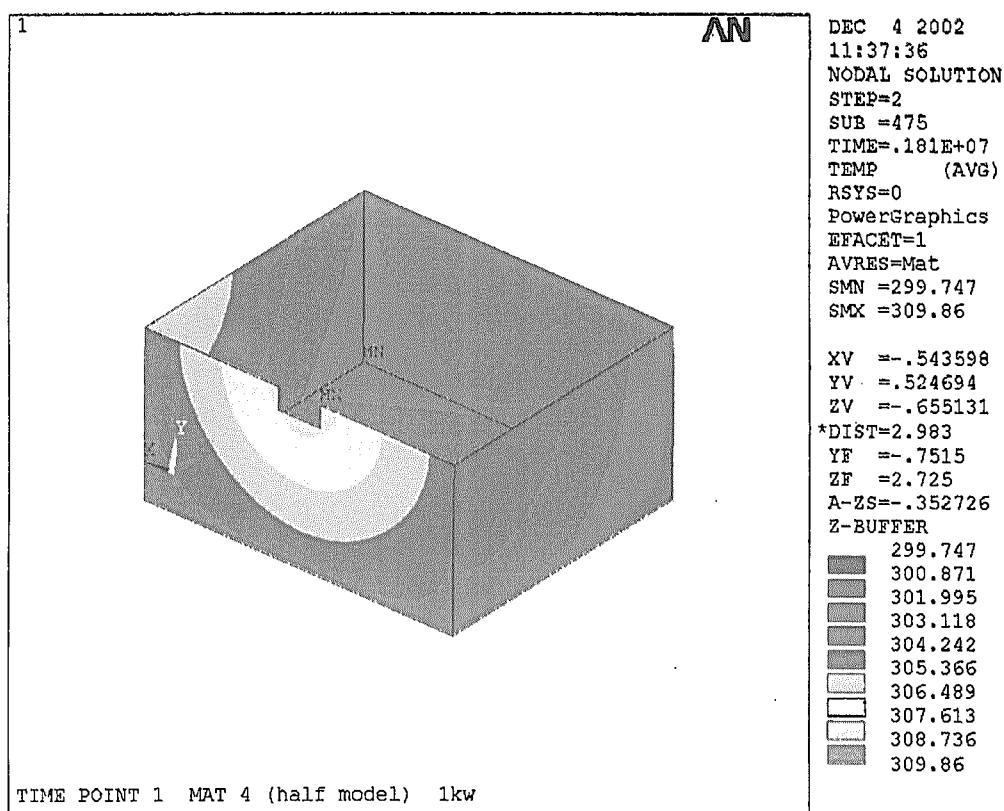


図3.57 TIME POINT 1 (21日経過時) 温度分布 GAP部(空間部)

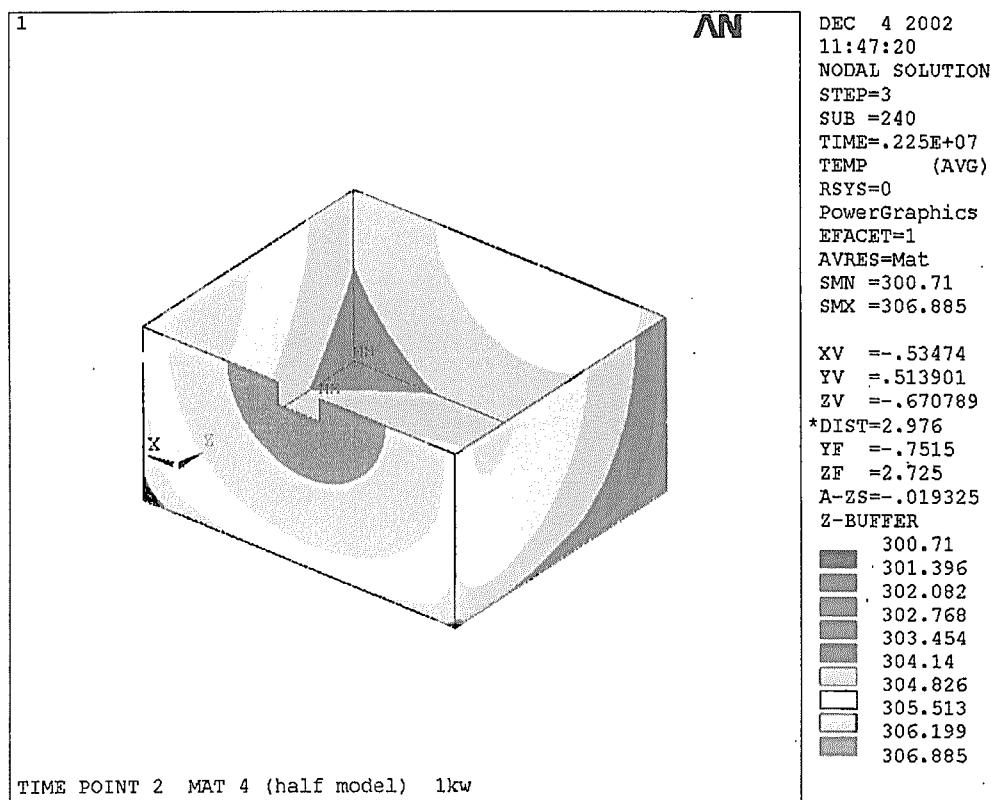


図3.58 TIME POINT 2 (26日経過時) 温度分布 GAP部(空間部)

This is a blank page.

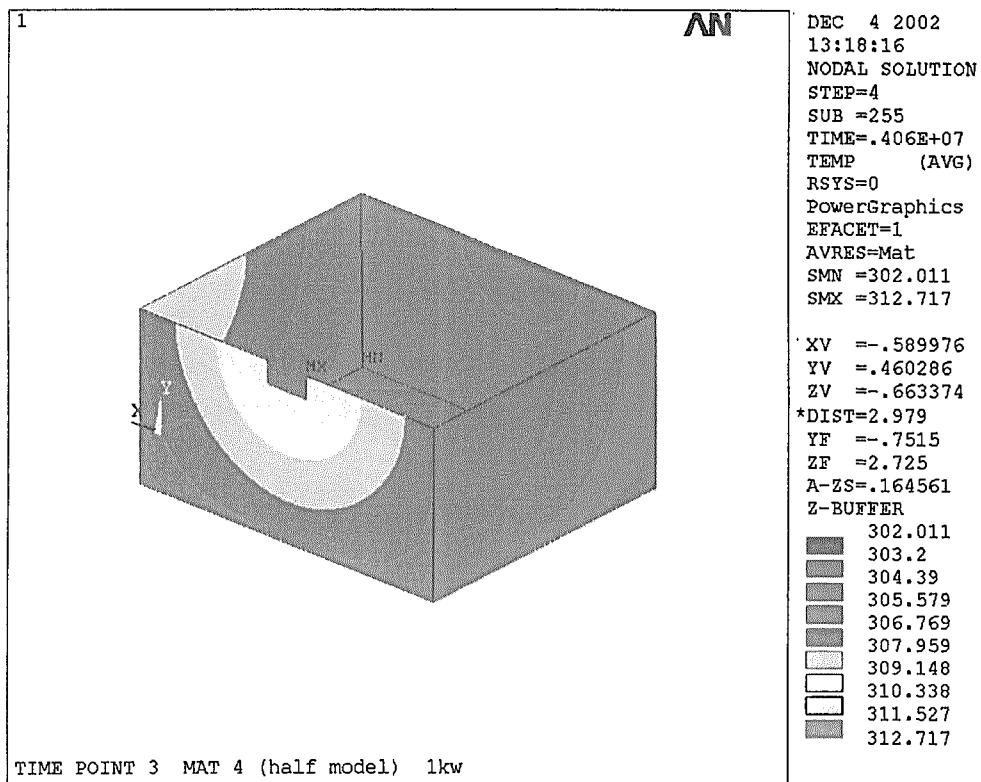


図3.59 TIME POINT 3 (47日経過時) 温度分布 GAP部(空間部)

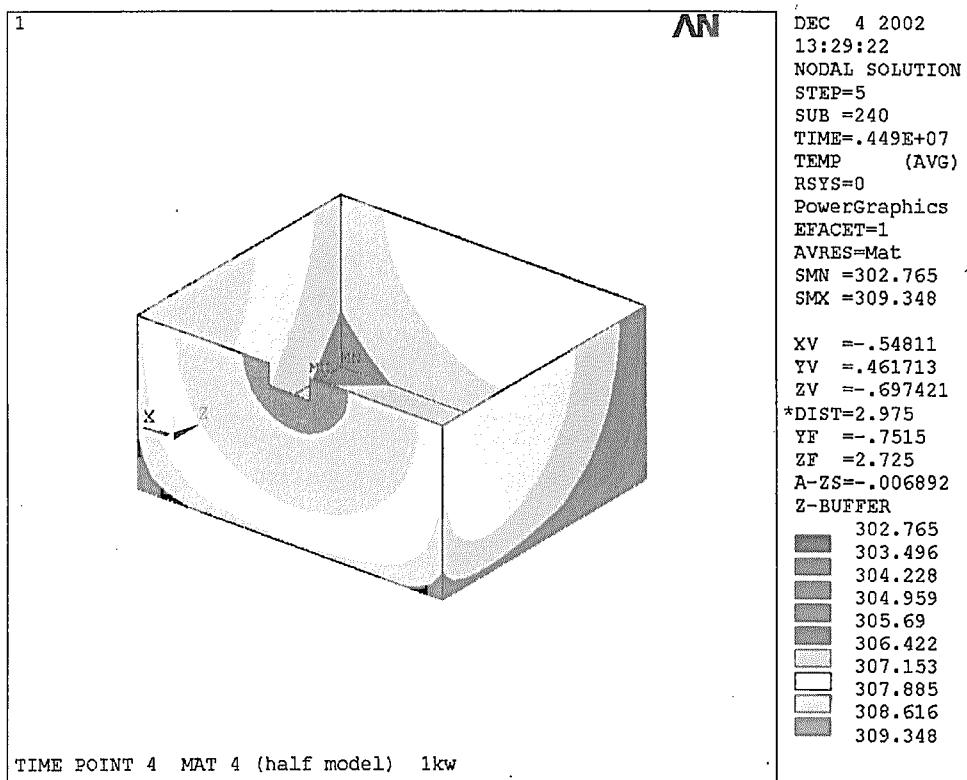


図3.60 TIME POINT 4 (52日経過時) 温度分布 GAP部(空間部)

This is a blank page.

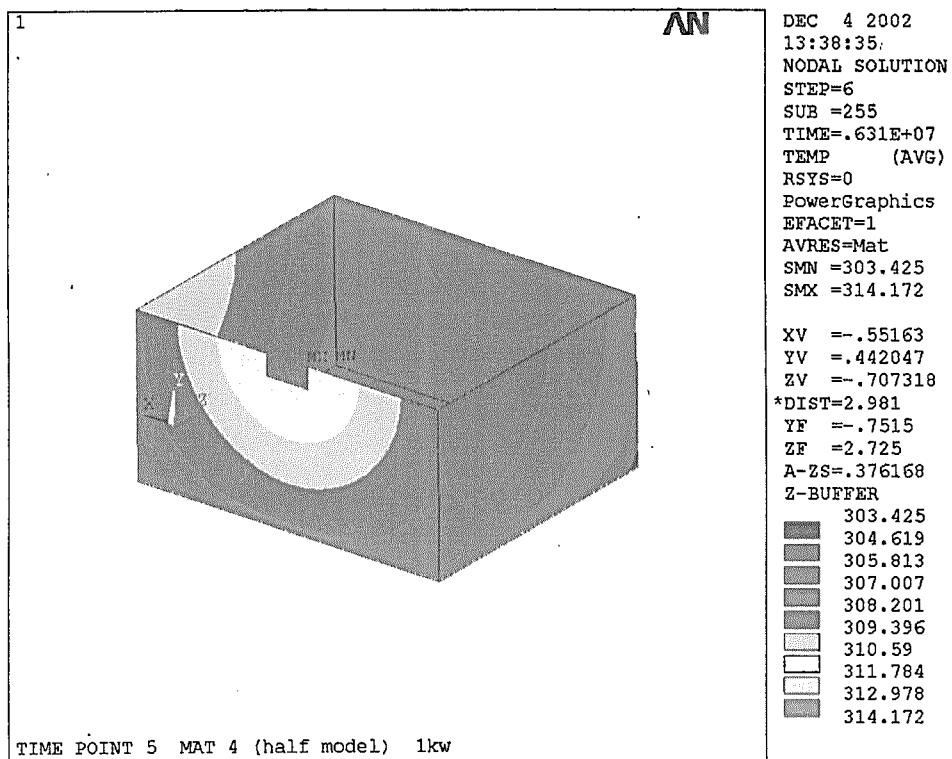


図3.61 TIME POINT 5 (73日経過時) 温度分布 GAP部(空間部)

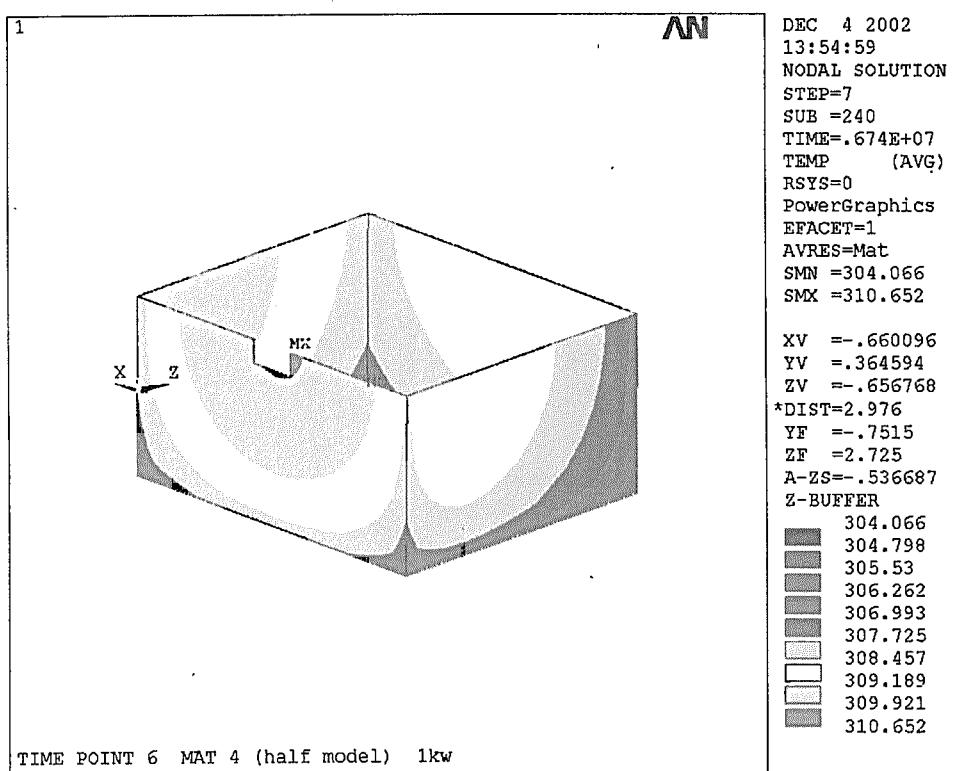


図3.62 TIME POINT 6 (78日経過時) 温度分布 GAP部(空間部)

This is a blank page.

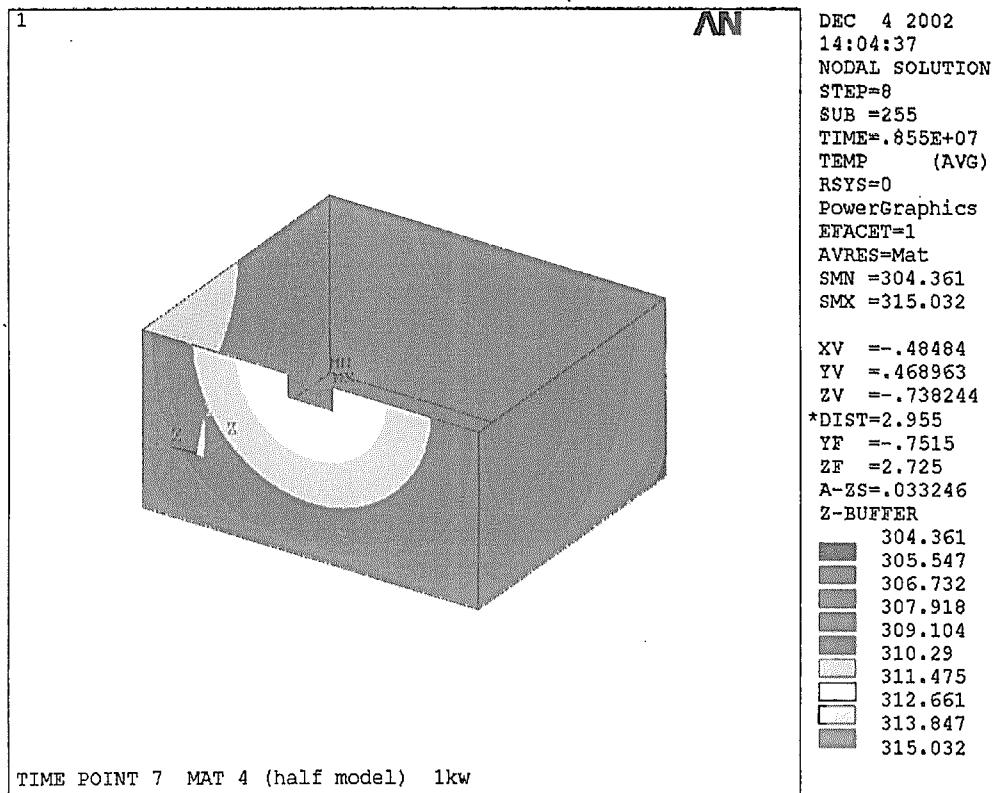


図3.63 TIME POINT 7 (99日経過時) 温度分布 GAP部(空間部)

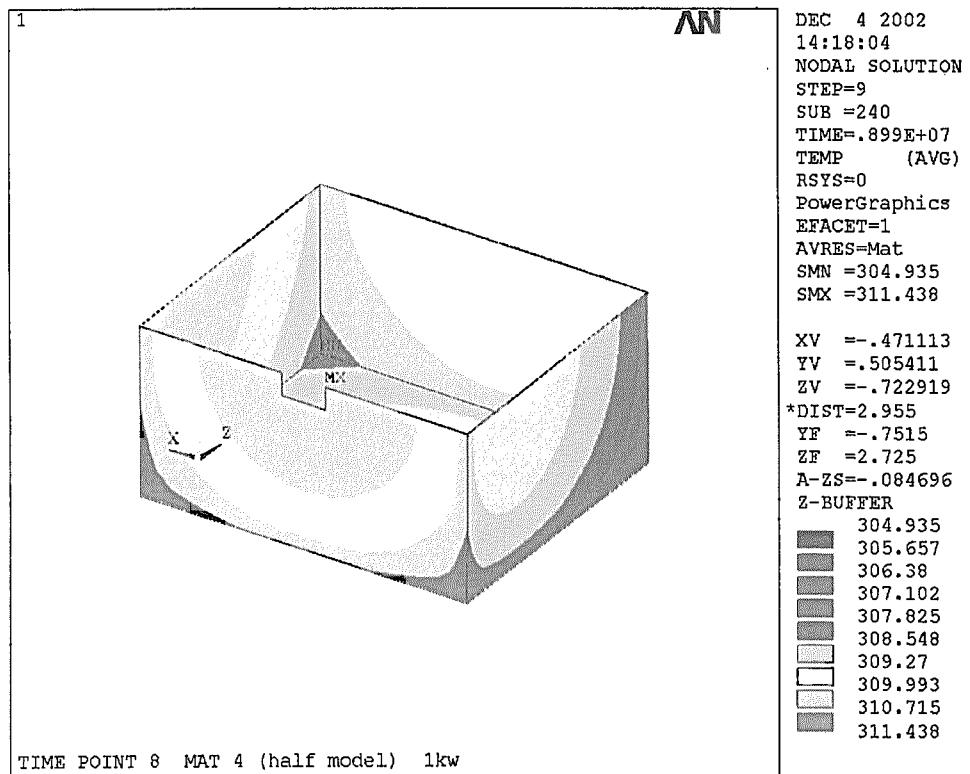


図3.64 TIME POINT 8 (104日経過時) 温度分布 GAP部(空間部)

This is a blank page.

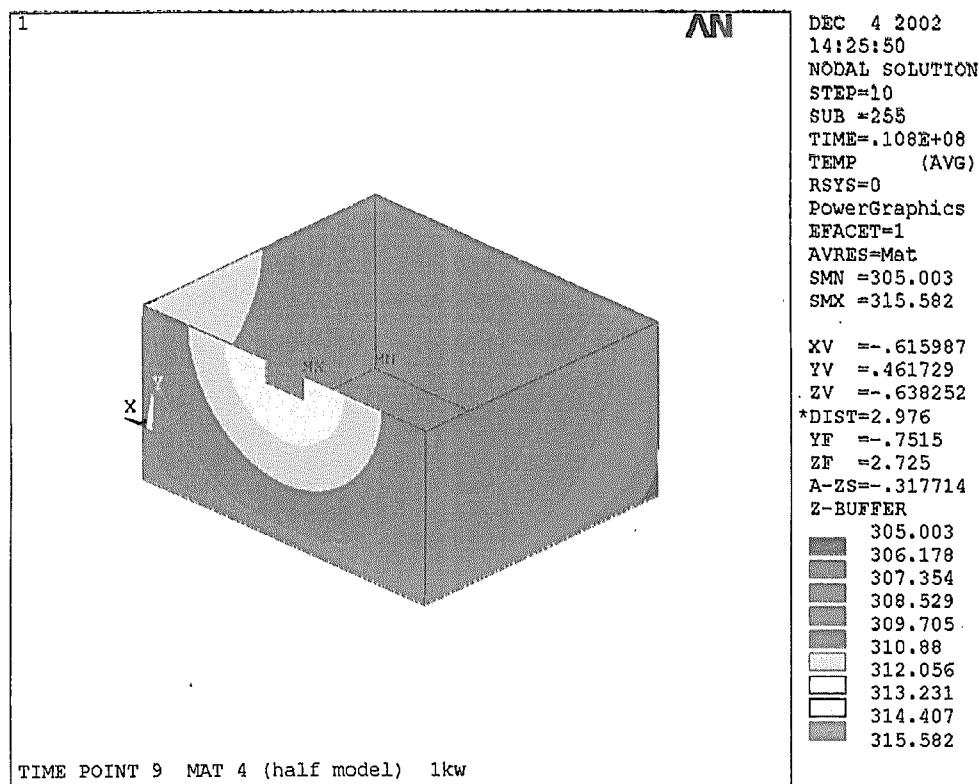


図3.65 TIME POINT 9 (125日経過時) 温度分布 GAP部(空間部)

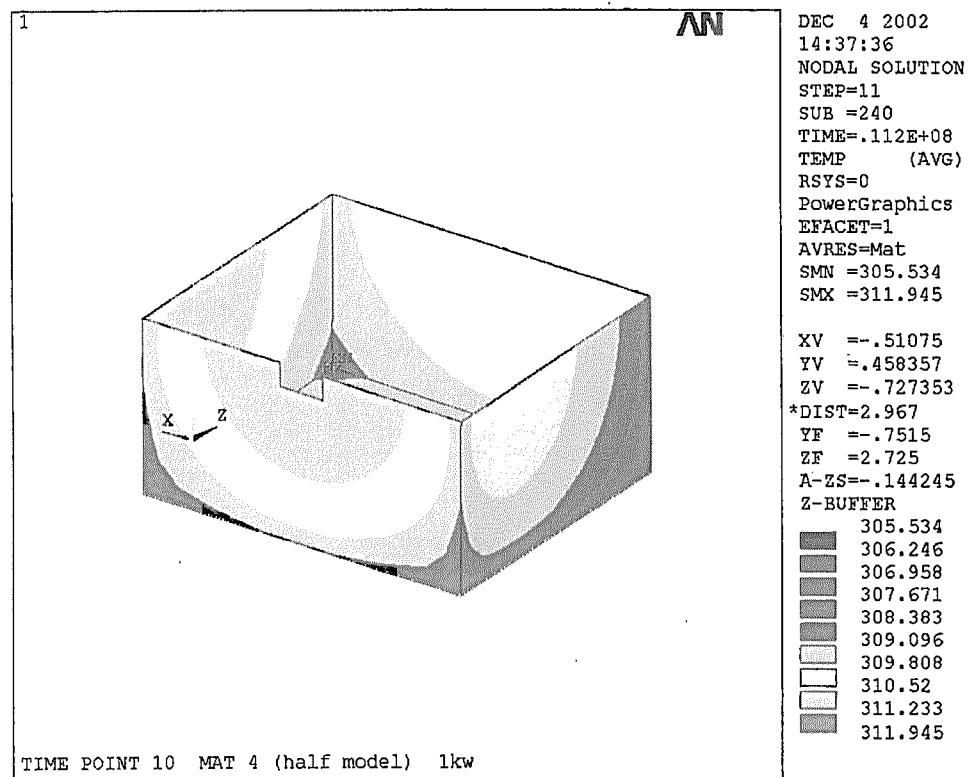


図3.66 TIME POINT 10 (130日経過時) 温度分布 GAP部(空間部)

This is a blank page.

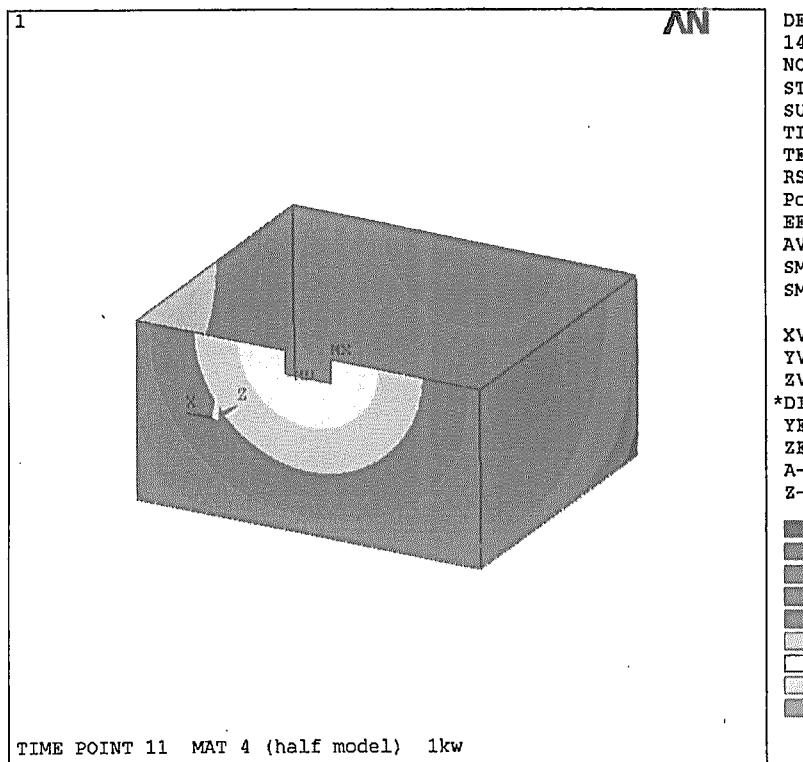


図3.67 TIME POINT 11 (151日経過時) 温度分布 GAP部(空間部)

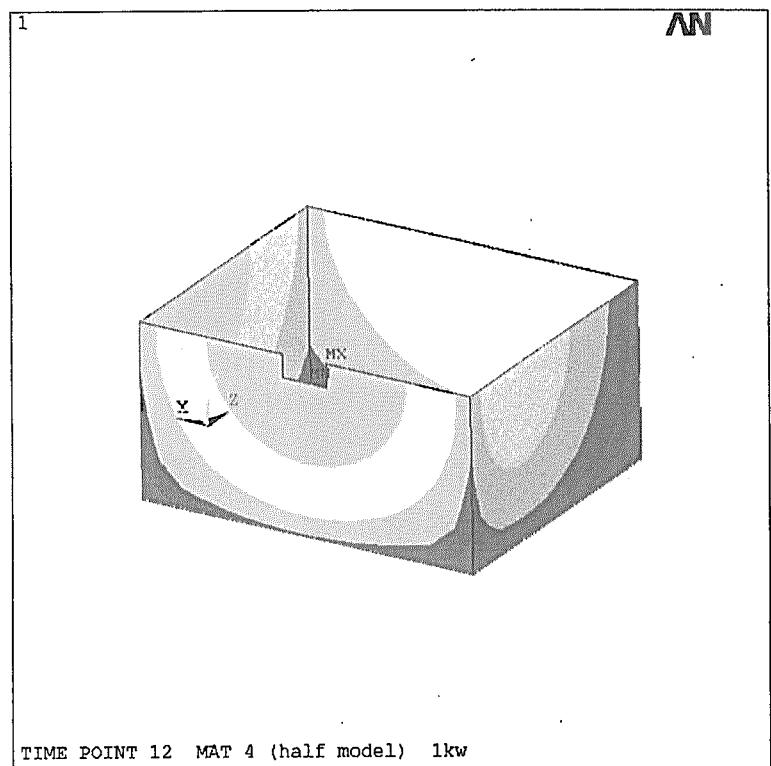


図3.68 TIME POINT 12 (156日経過時) 温度分布 GAP部(空間部)

This is a blank page.

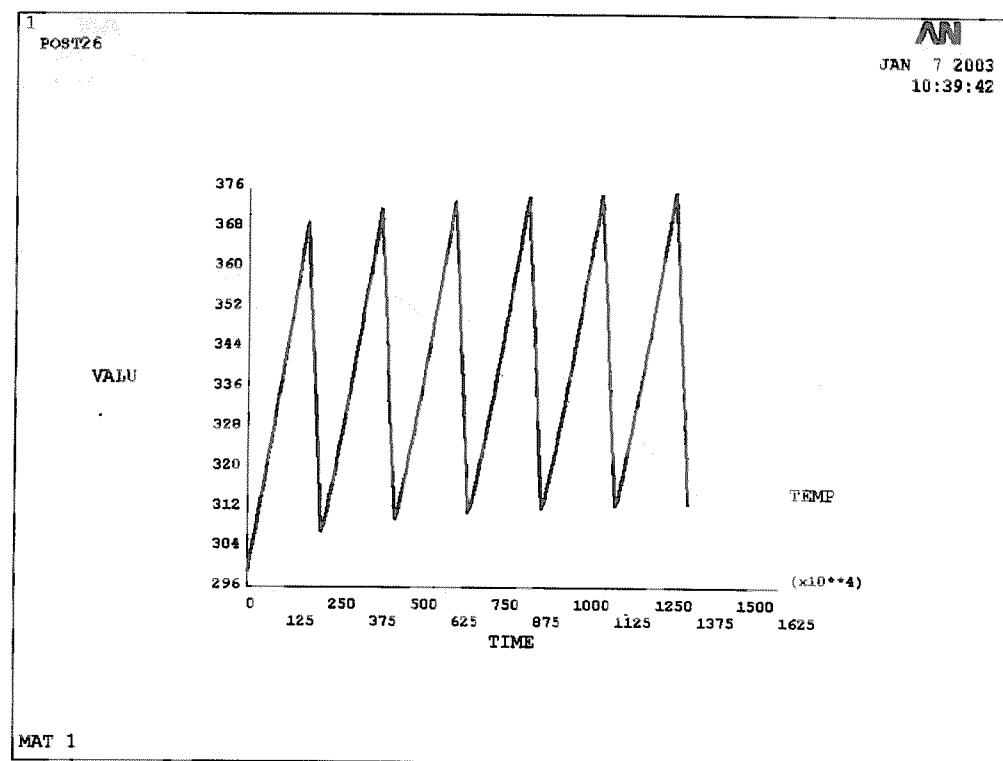


図3.69 鉄物性内最高温度節点温度推移 単位:K

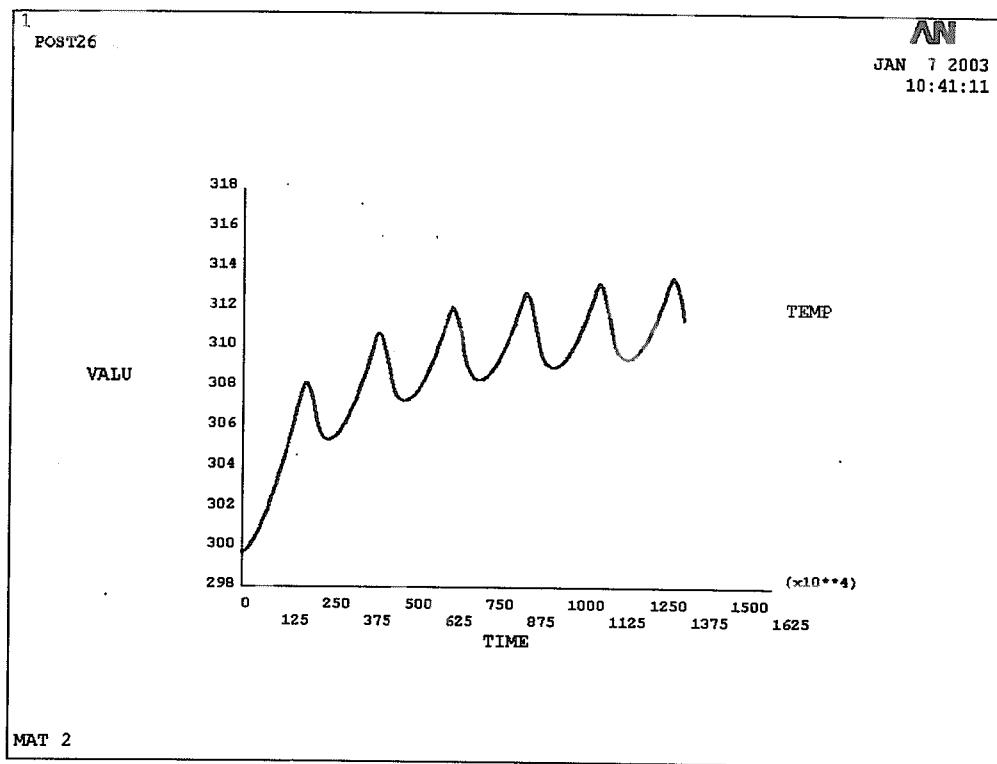


図3.70 コンクリート物性内最高温度節点温度推移 単位:K

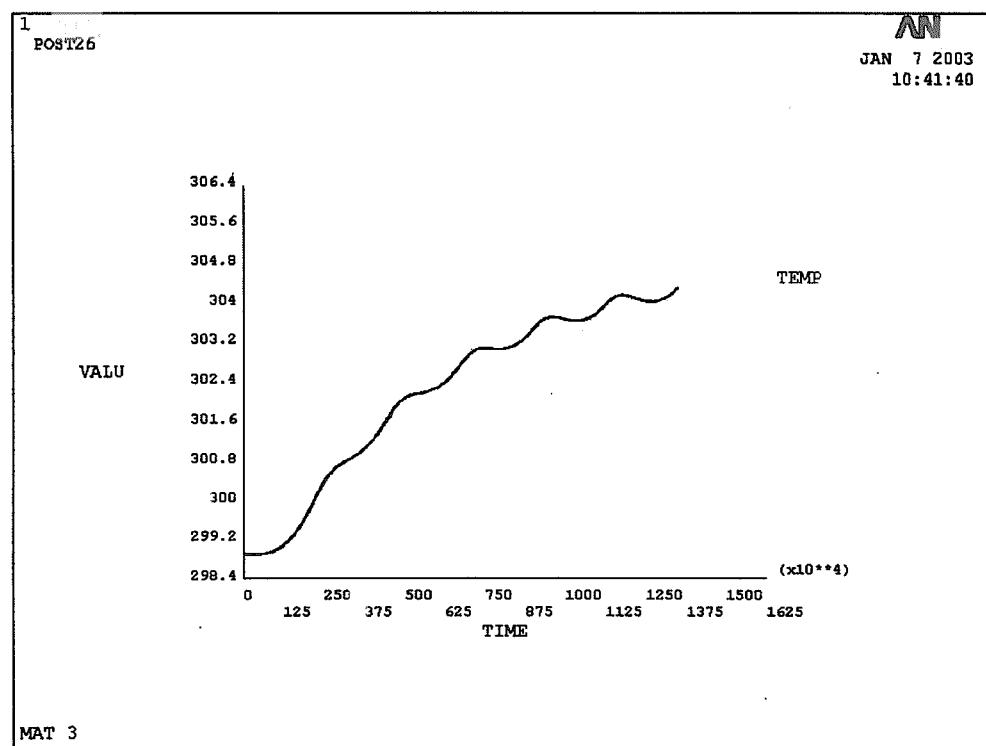


図3.71 砂物性内最高温度節点温度推移 単位:K

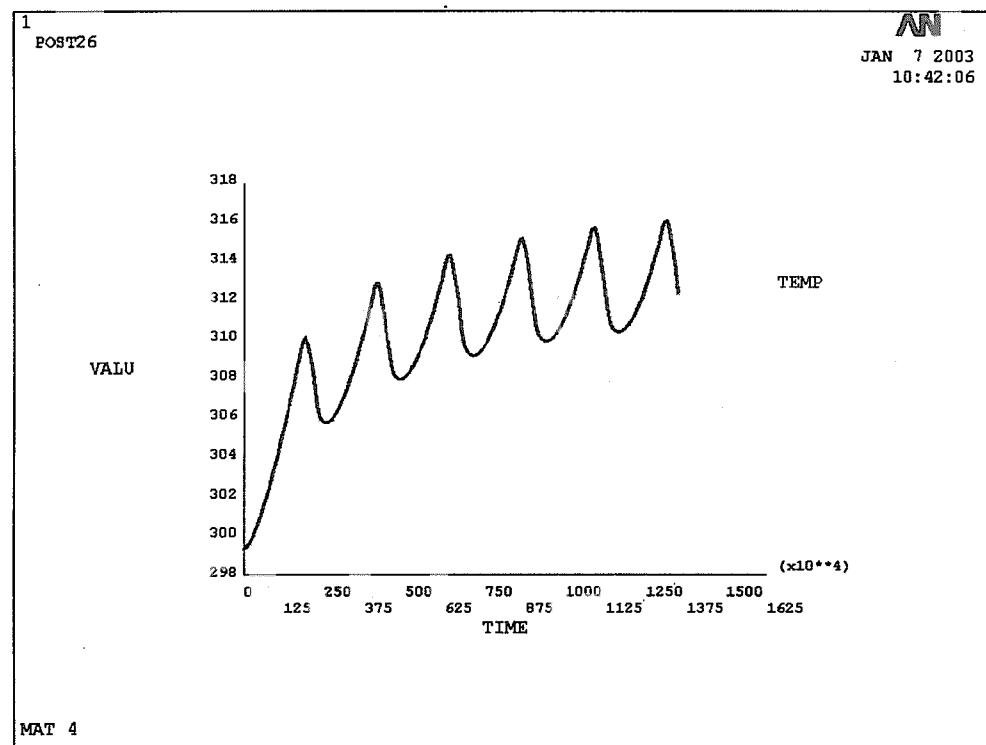


図3.72 空間物性内最高温度節点温度推移 単位:K

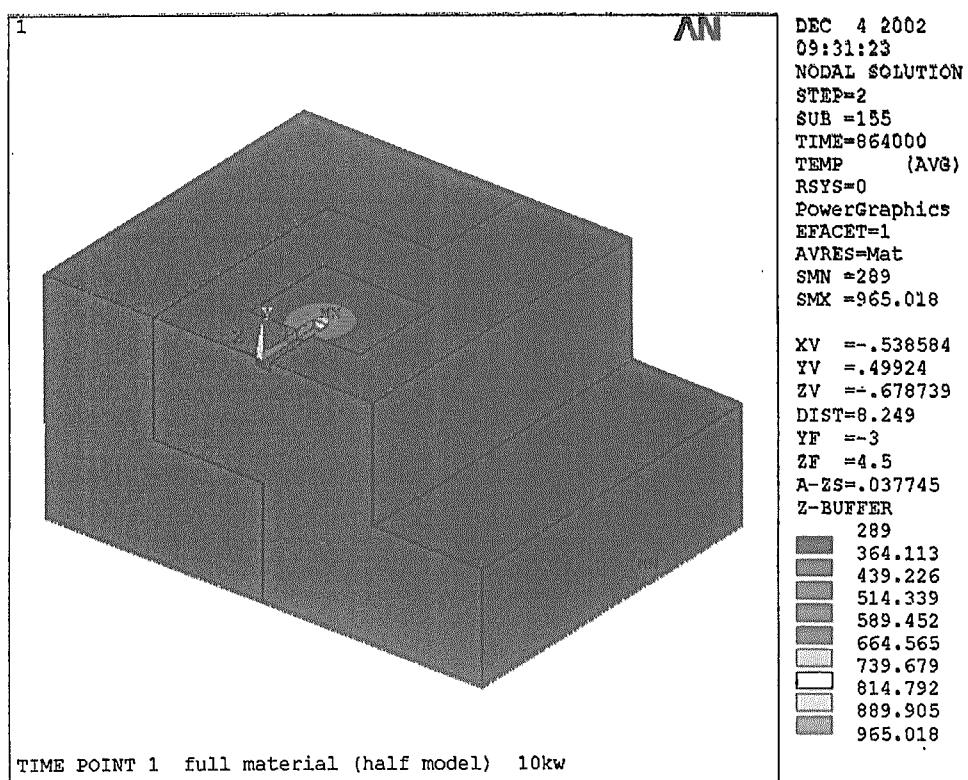


図3.73 10kWビーム10日間照射時温度分布 モデル全体

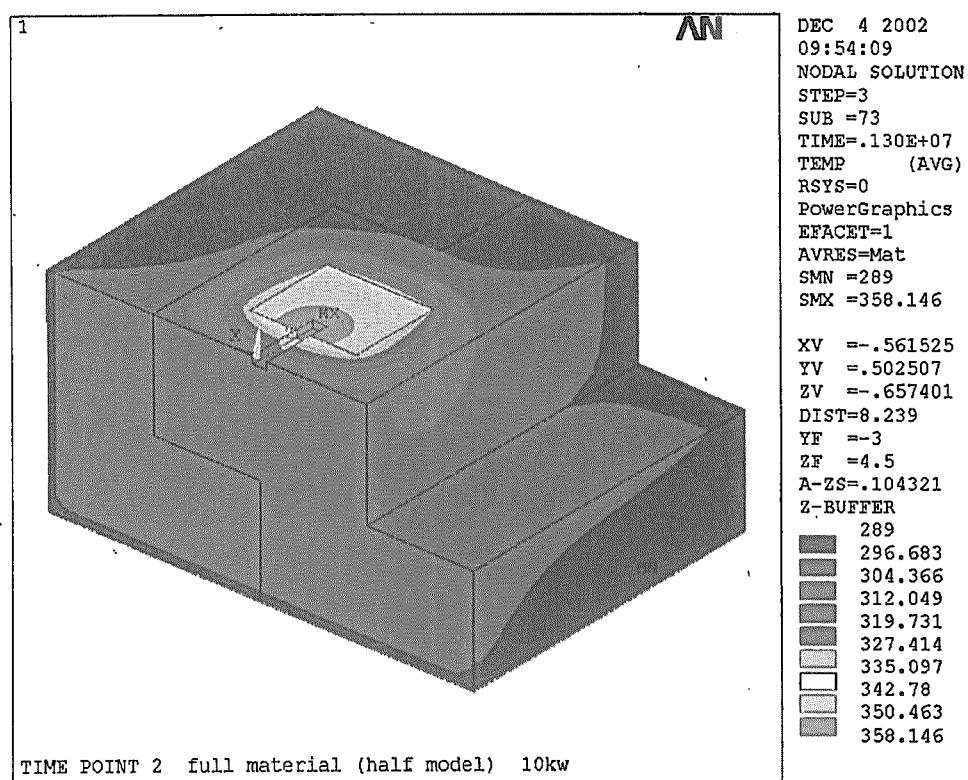


図3.74 10kWビーム10日間照射後5日間経過時温度分布 モデル全体

This is a blank page.

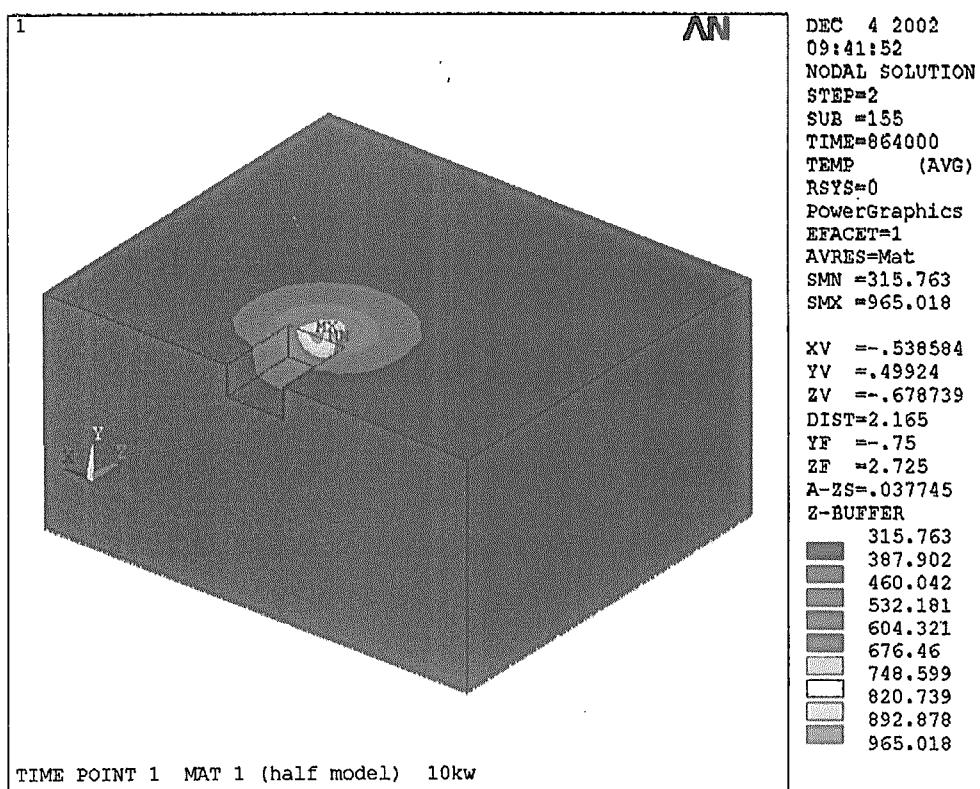


図3.75 10kWビーム10日間照射時温度分布 鉄部

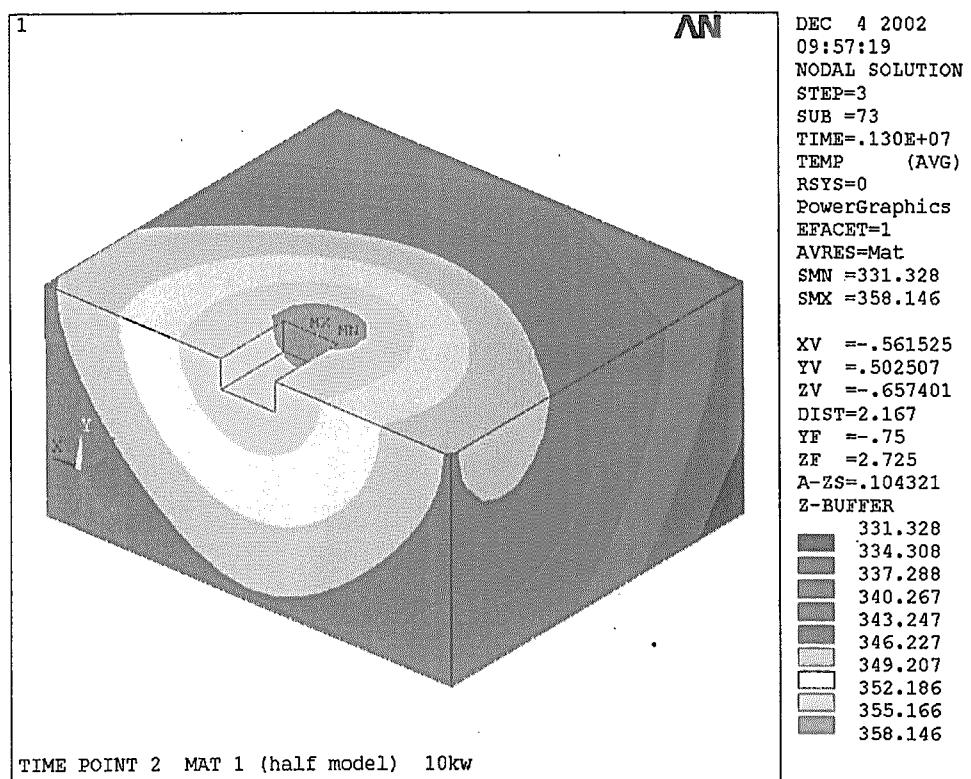


図3.76 10kWビーム10日間照射後5日間経過時温度分布 鉄部

This is a blank page.

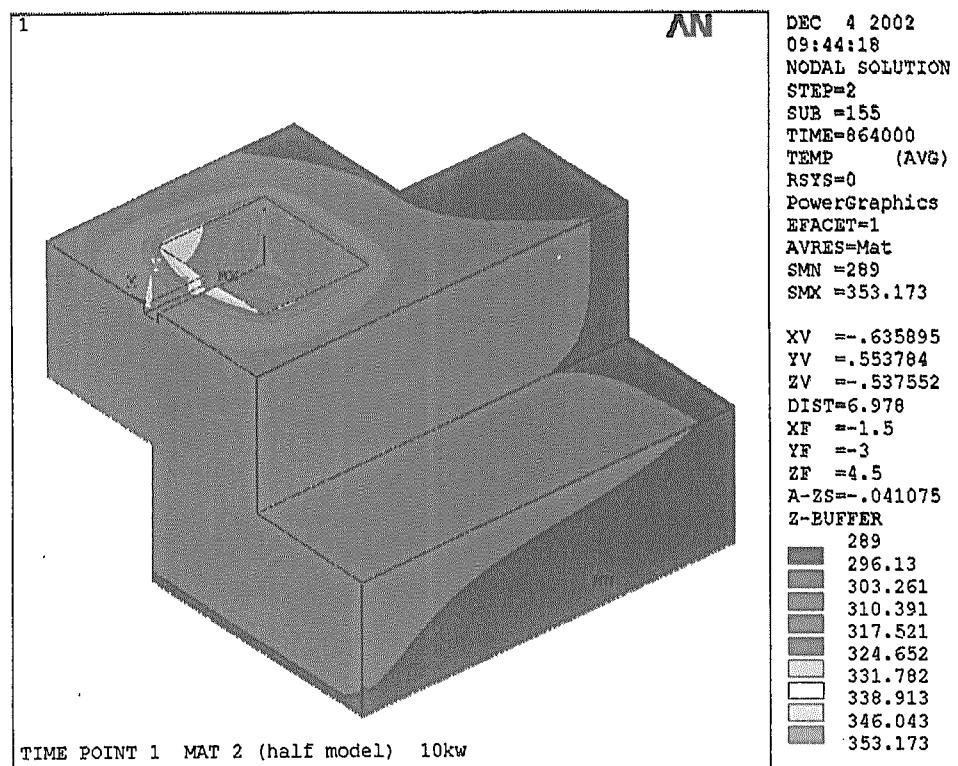


図3.77 10kWビーム10日間照射時温度分布 コンクリート部

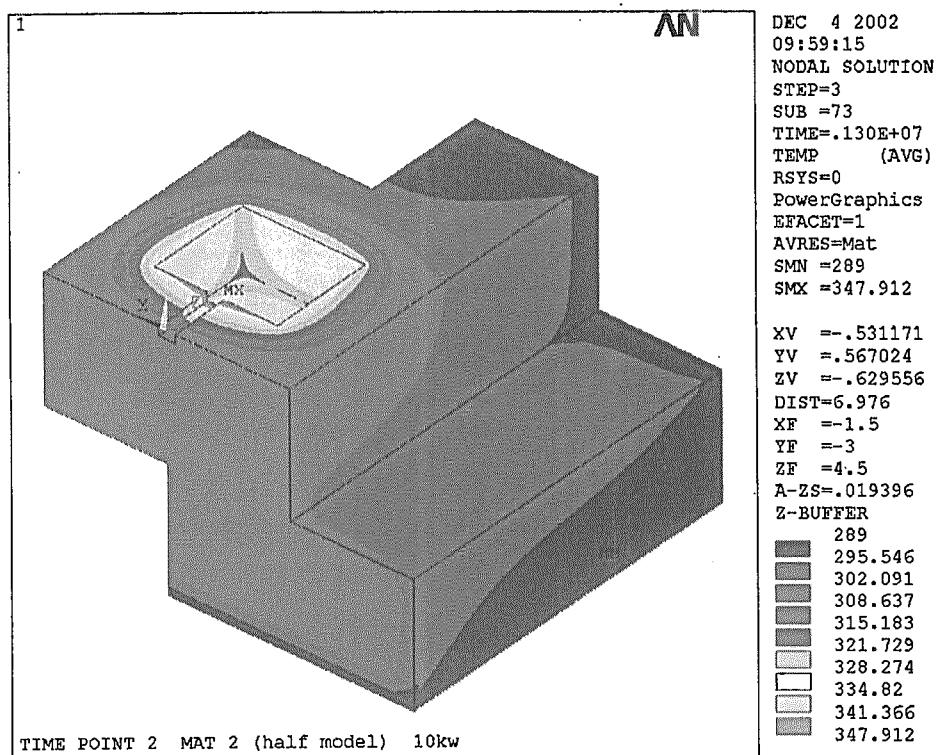


図3.78 10kWビーム10日間照射後5日間経過時温度分布 コンクリート部

This is a blank page.

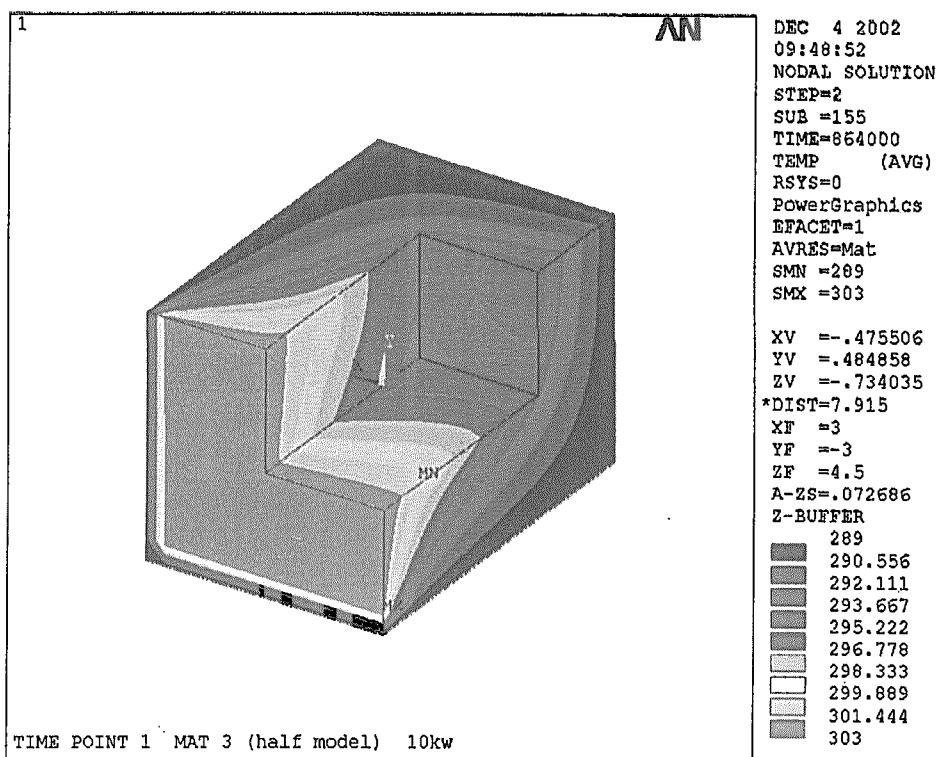


図3.79 10kWビーム10日間照射時温度分布 砂部

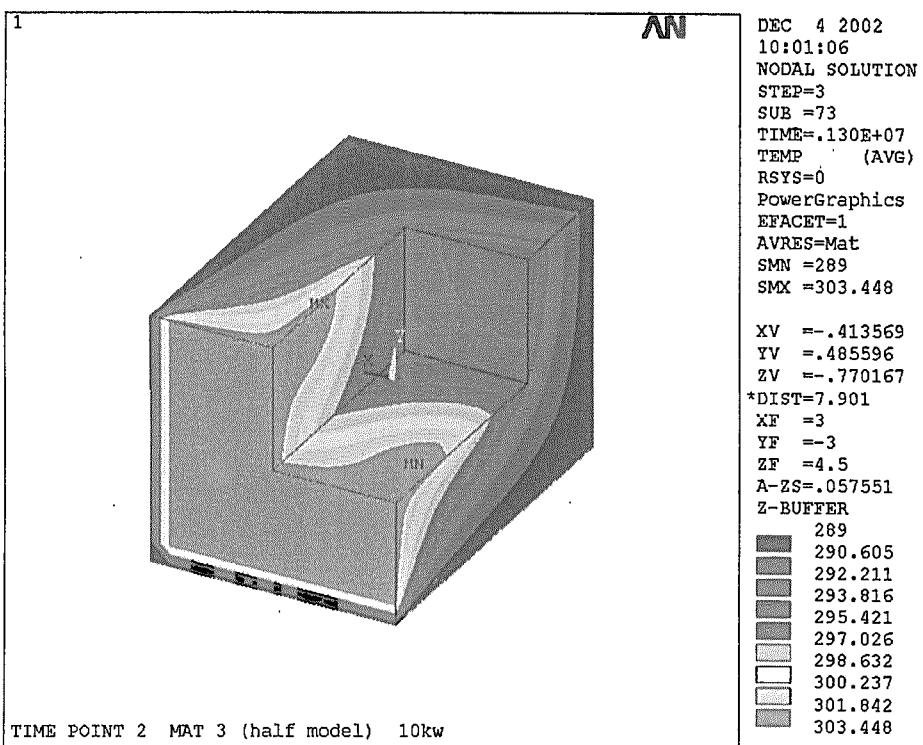


図3.80 10kWビーム10日間照射後5日間経過時温度分布 砂部

This is a blank page.

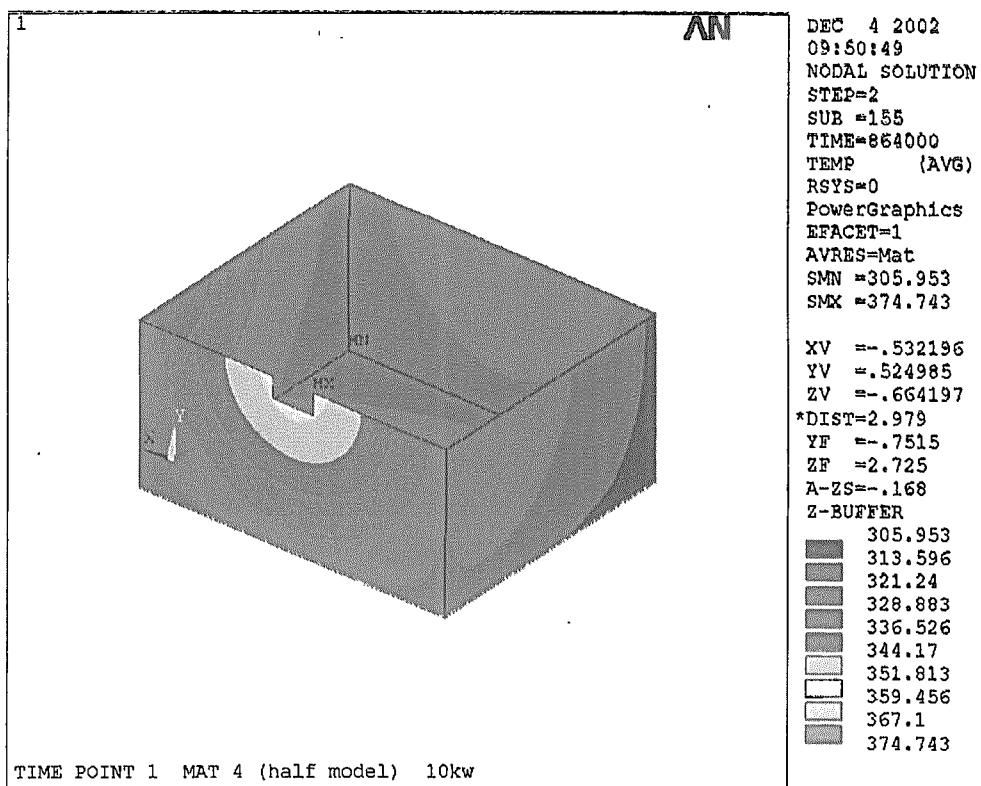


図3.81 10kWビーム10日間照射時温度分布 空間部

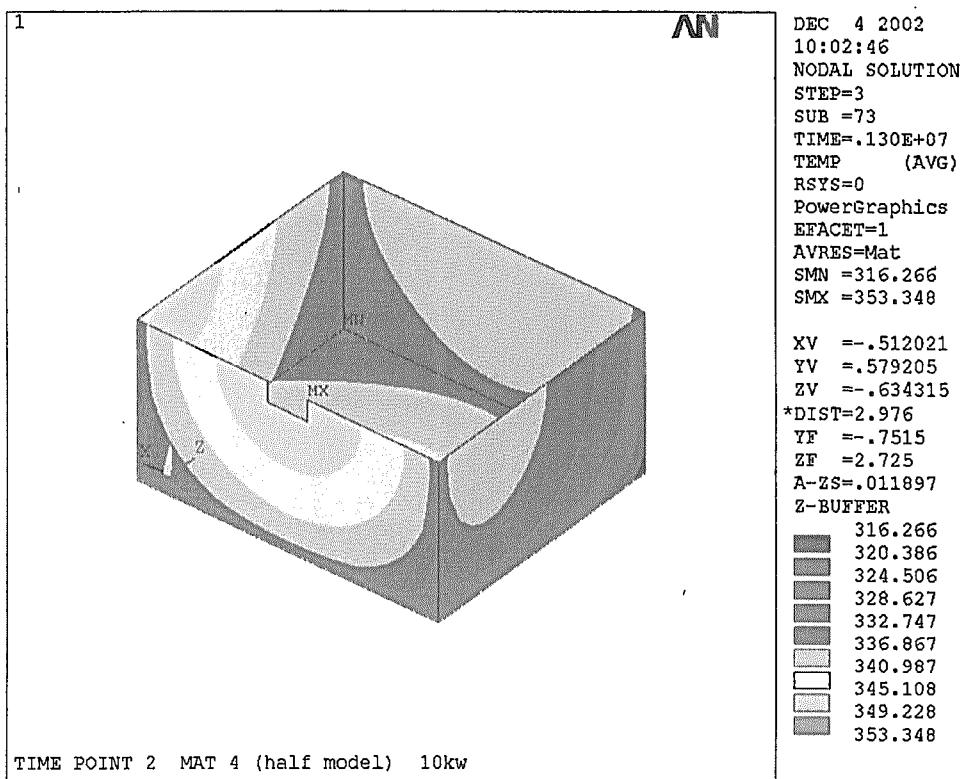


図3.82 10kWビーム10日間照射後5日間経過時温度分布 空間部

This is a blank page.

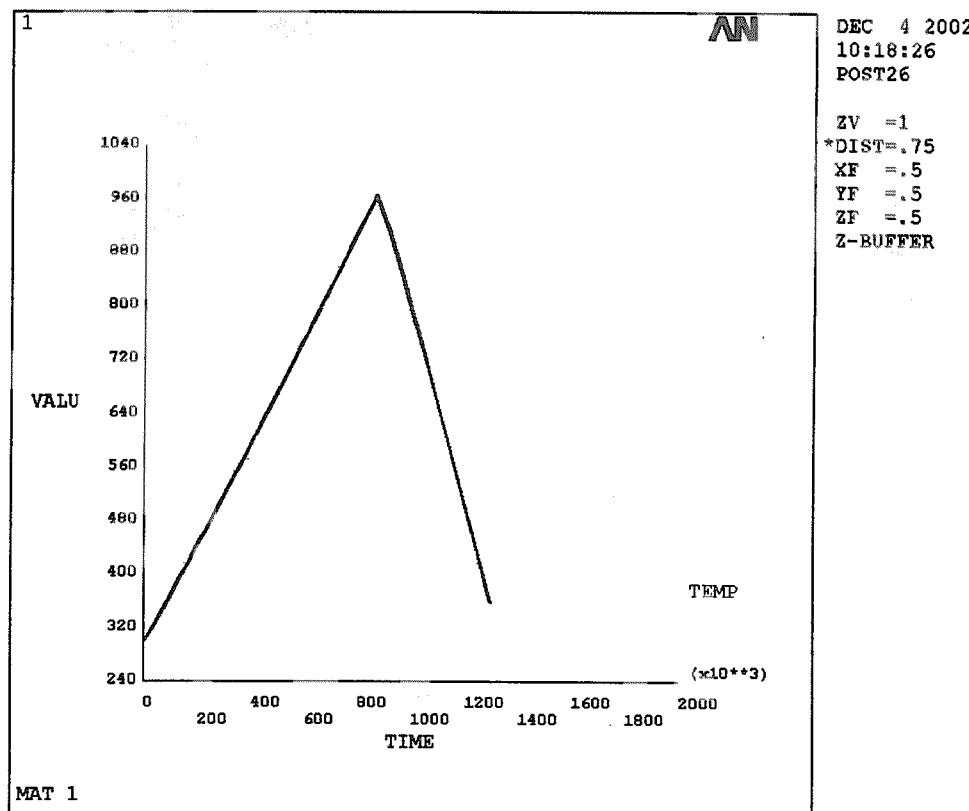


図3.83 鉄物性内最高温度節点温度推移 10kWビーム 単位:K

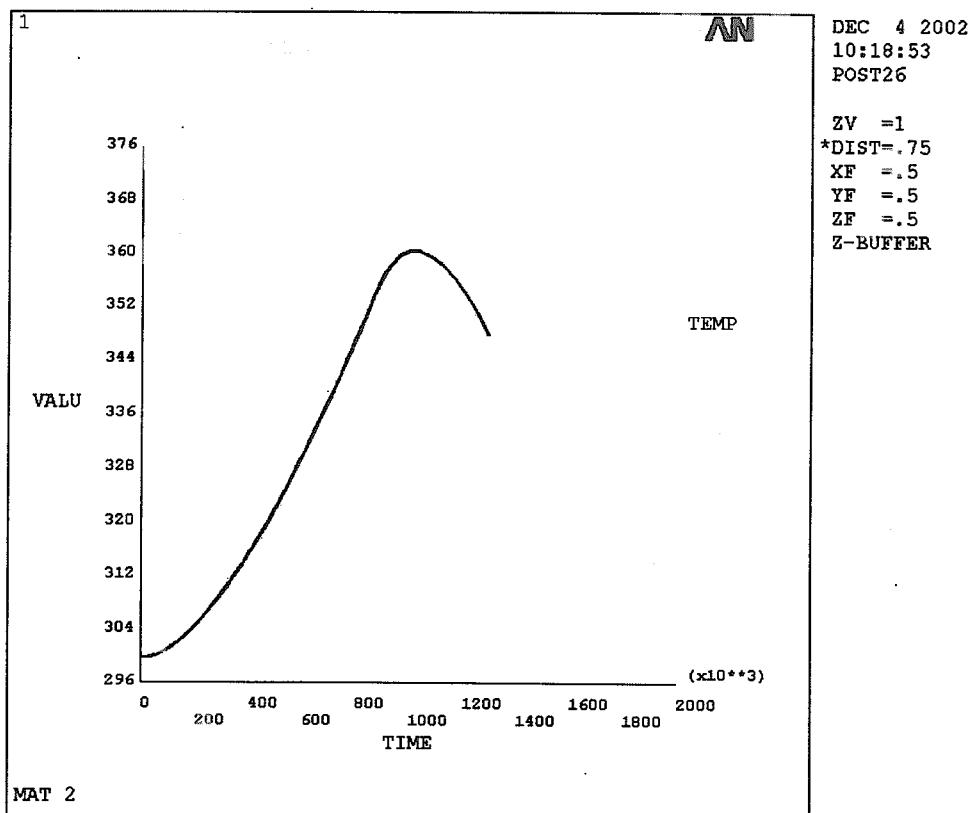


図3.84 コンクリート物性内最高温度節点温度推移 10kWビーム 単位:K

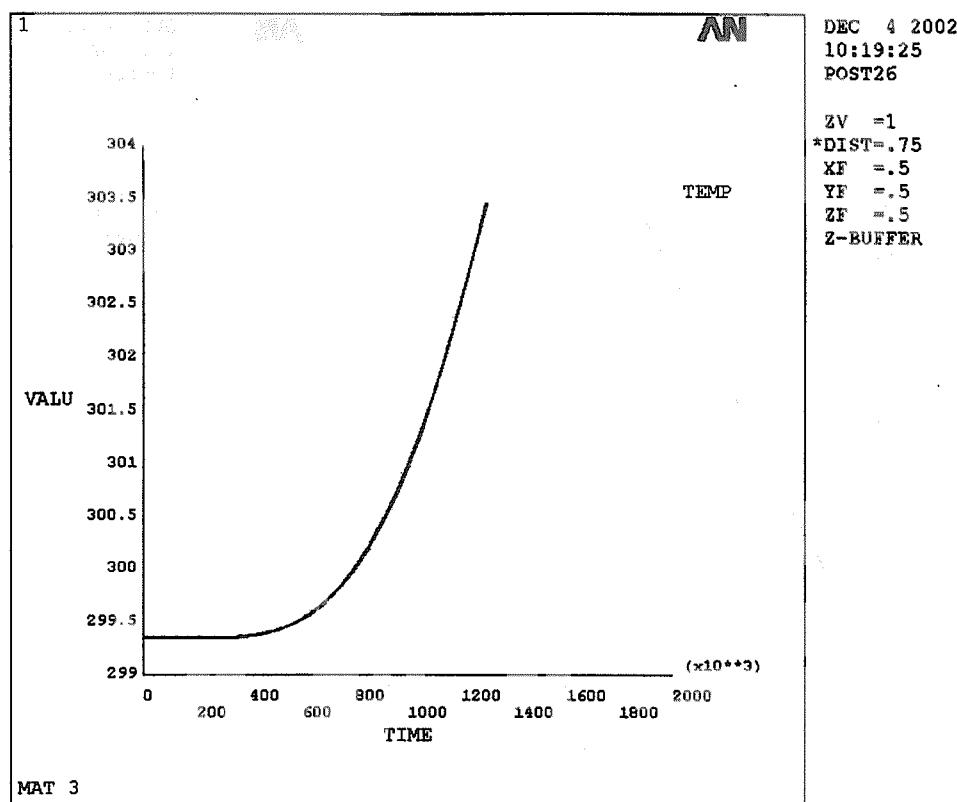


図3.85 砂物性内最高温度節点温度推移 10kWビーム 単位:K

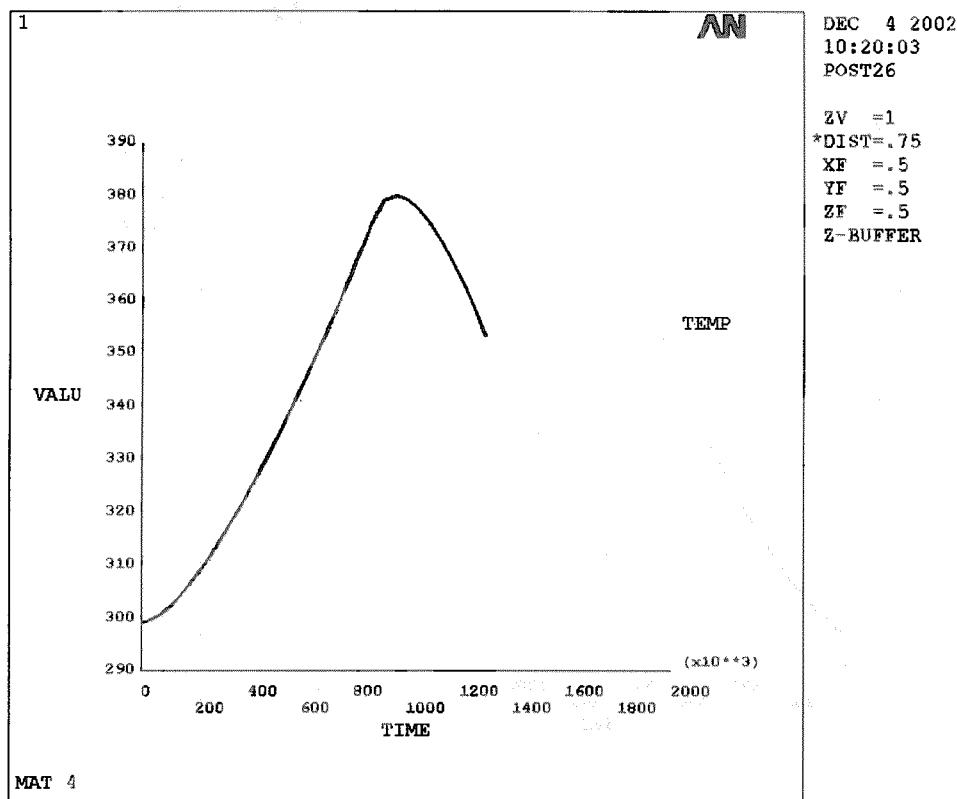


図3.86 空間物性内最高温度節点温度推移 10kWビーム 単位:K

#### 4 入射ビームダンプの熱応力解析

計算コード ANSYS を用いて行った温度分布解析により得られた計算結果の温度分布データを入力データとし、熱が入射ビームダンプに与える影響を確認するために熱応力解析計算を行った。表 4.2 に熱応力解析計算に使用した物性値を示す。

1 kW ビーム照射時の計算条件は連続運転時の 151 日目の温度分布データを、10 kW 時は 10 日目の温度分布データを入力データとして使用した。各計算とともに、各物性の熱線膨張計算の参照温度（ひずみが 0）は 289K とした。以下に熱応力解析計算の結果表を示し、物性値表以降に拘束条件及び、熱応力解析計算結果の図表リストを示す。

表 4.1 入射ビームダンプ熱応力解析計算結果表

		最大変位 (mm)	応力強さ(MPa)	相当応力(MPa)
1kW	鉄	1.059	108	96
	コンクリート	0.109	0.161	0.146
10kW	鉄	2.855	1353	1203
	コンクリート	0.108	0.251	0.218

\*) 鉄の許容相当応力は約 300MPa である。

表 4.2 入射ビームダンプ熱応力解析計算使用物性値表

	単位	鉄	コンクリート	砂
ヤング率	MPa	2.1E5	2200	1.0E-3
ポアソン比	—	0.3	0.2	0.3
線膨張率	$\alpha/K$ (100K)	5.6E-6		
	$\alpha/K$ (293K)	1.18E-5	1.0E-6	1.0E-6
	$\alpha/K$ (500K)	1.44E-5		
	$\alpha/K$ (800K)	1.62E-5		

図 4.1 热応力解析計算時拘束条件

図 4.2 モデル全体(1kW ビーム) X 軸方向 (モデル左右方向) 変位

図 4.3 モデル全体(1kW ビーム) Y 軸方向 (モデル上下方向) 変位

図 4.4 モデル全体(1kW ビーム) Z 軸方向 (モデル奥行方向) 変位

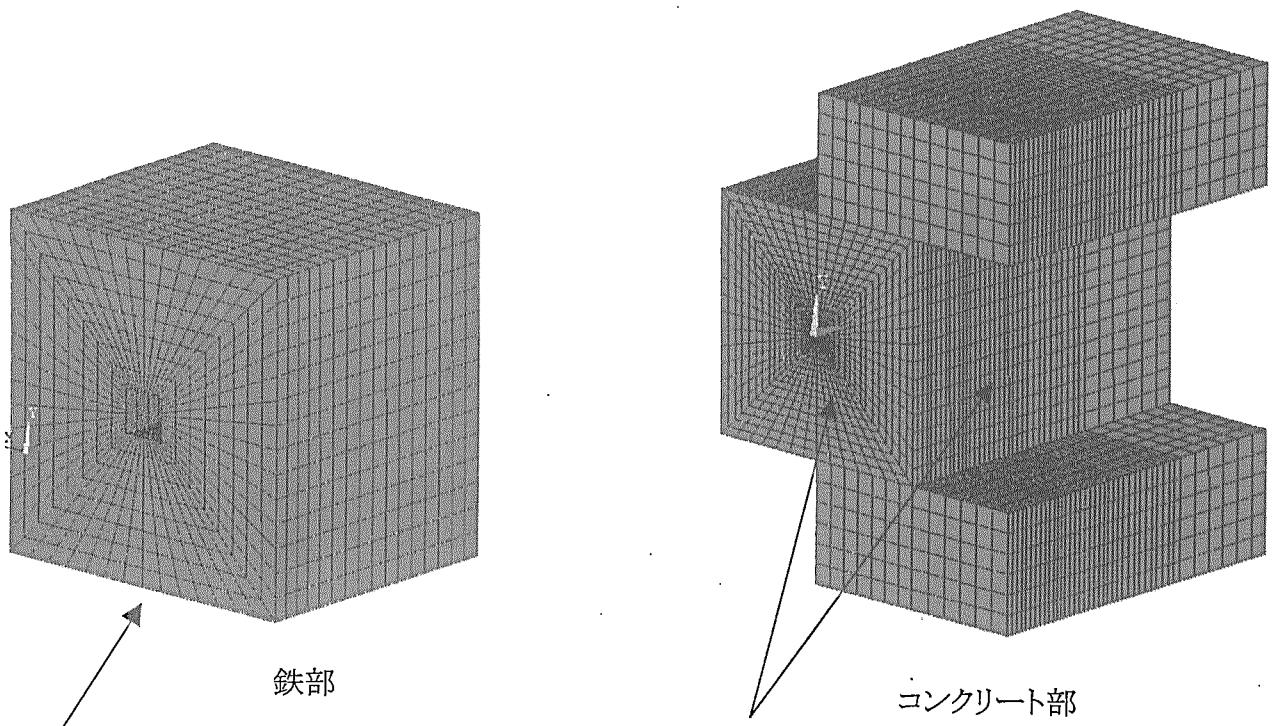
図 4.5 モデル全体(1kW ビーム) 変位

図 4.6 モデル全体(1kW ビーム) 応力強さ

図 4.7 モデル全体(1kW ビーム) 相当応力

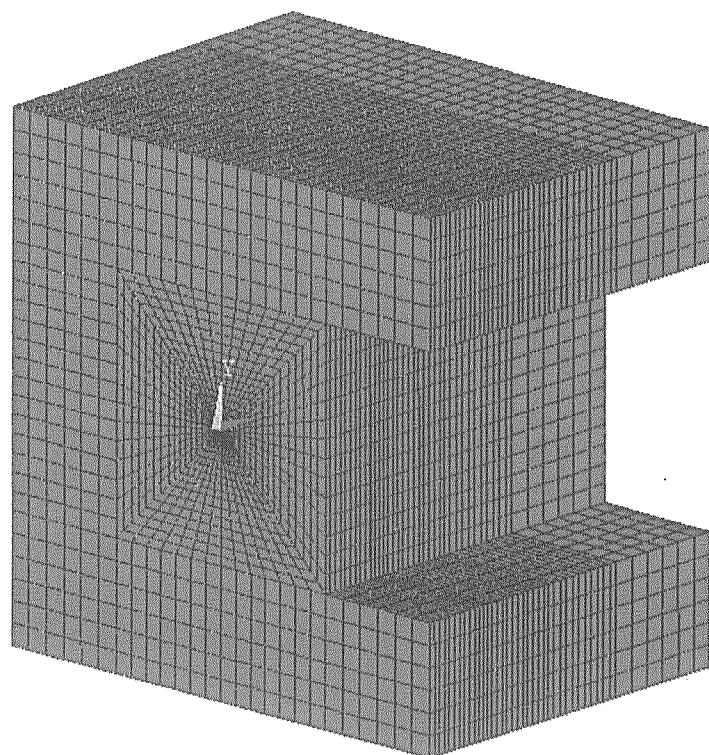
図 4.8 鉄部(1kW ビーム) X 軸方向 (モデル左右方向) 変位

- 図 4.9 鉄部(1kW ビーム) Y 軸方向 (モデル上下方向)変位  
図 4.10 鉄部(1kW ビーム) Z 軸方向 (モデル奥行方向)変位  
図 4.11 鉄部(1kW ビーム) 変位  
図 4.12 鉄部(1kW ビーム) 応力強さ  
図 4.13 鉄部(1kW ビーム) 相当応力  
図 4.14 コンクリート部(1kW ビーム) X 軸方向 (モデル左右方向)変位  
図 4.15 コンクリート部(1kW ビーム) Y 軸方向 (モデル上下方向)変位  
図 4.16 コンクリート部(1kW ビーム) Z 軸方向 (モデル奥行方向)変位  
図 4.17 コンクリート部(1kW ビーム) 変位  
図 4.18 コンクリート部(1kW ビーム) 応力強さ  
図 4.19 コンクリート部(1kW ビーム) 相当応力  
図 4.20 モデル全体(10kW ビーム) X 軸方向 (モデル左右方向)変位  
図 4.21 モデル全体(10kW ビーム) Y 軸方向 (モデル上下方向)変位  
図 4.22 モデル全体(10kW ビーム) Z 軸方向 (モデル奥行方向)変位  
図 4.23 モデル全体(10kW ビーム) 変位  
図 4.24 モデル全体(10kW ビーム) 応力強さ  
図 4.25 モデル全体(10kW ビーム) 相当応力  
図 4.26 鉄部(10kW ビーム) X 軸方向 (モデル左右方向)変位  
図 4.27 鉄部(10kW ビーム) Y 軸方向 (モデル上下方向)変位  
図 4.28 鉄部(10kW ビーム) Z 軸方向 (モデル奥行方向)変位  
図 4.29 鉄部(10kW ビーム) 変位  
図 4.30 鉄部(10kW ビーム) 応力強さ  
図 4.31 鉄部(10kW ビーム) 相当応力  
図 4.32 コンクリート部(10kW ビーム) X 軸方向 (モデル左右方向)変位  
図 4.33 コンクリート部(10kW ビーム) Y 軸方向 (モデル上下方向)変位  
図 4.34 コンクリート部(10kW ビーム) Z 軸方向 (モデル奥行方向)変位  
図 4.35 コンクリート部(10kW ビーム) 変位  
図 4.36 コンクリート部(10kW ビーム) 応力強さ  
図 4.37 コンクリート部(10kW ビーム) 相当応力



鉄部の最下部がコンクリート部と連結している  
ものとする。

正面+トンネル内表面以外を完全拘束とする。



モデル全体

図4.1 熱応力解析計算時拘束条件

This is a blank page.

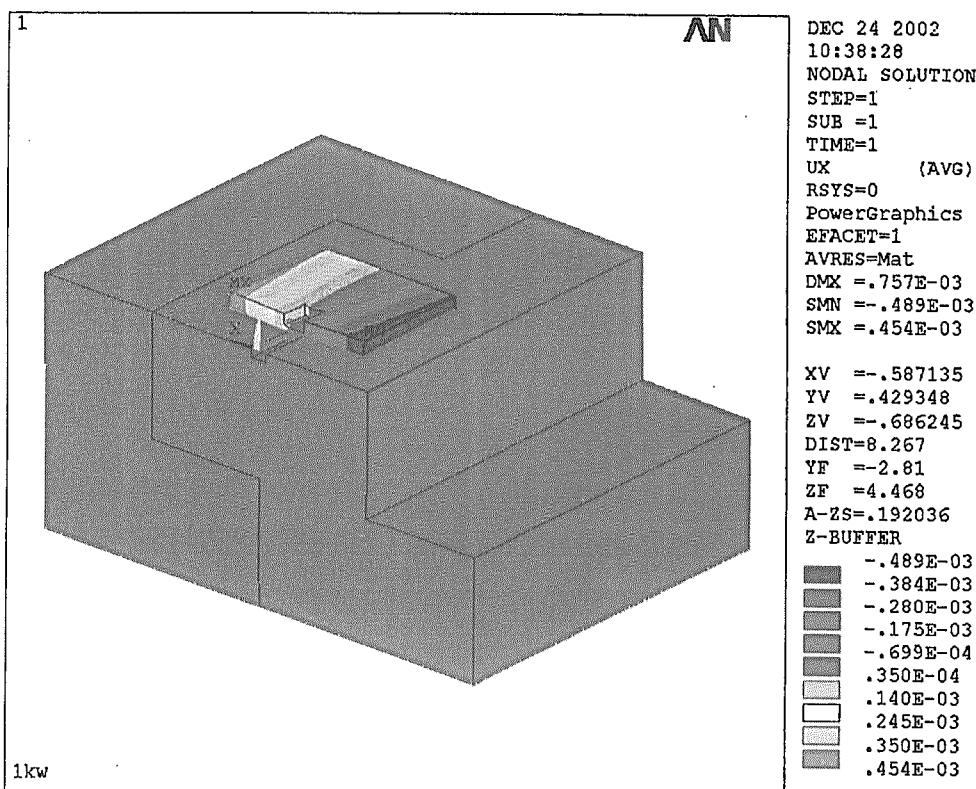


図4.2 モデル全体(1kWビーム) X軸方向(モデル左右方向)変位 単位:メートル

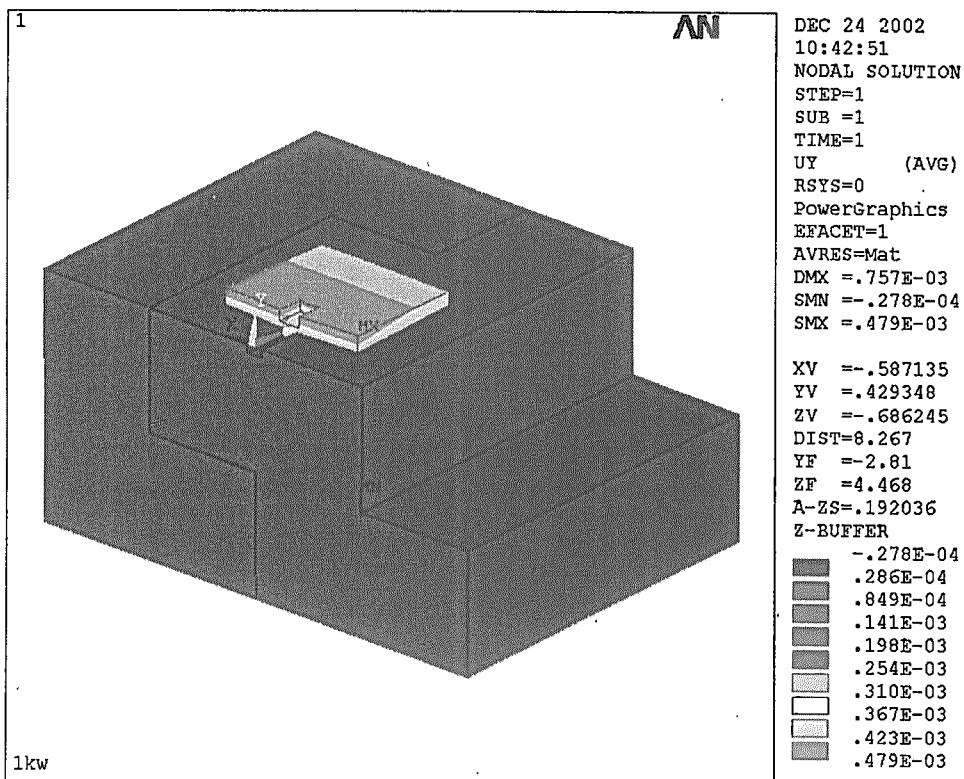


図4.3 モデル全体(1kWビーム) Y軸方向(モデル上下方向)変位 単位:メートル

This is a blank page.

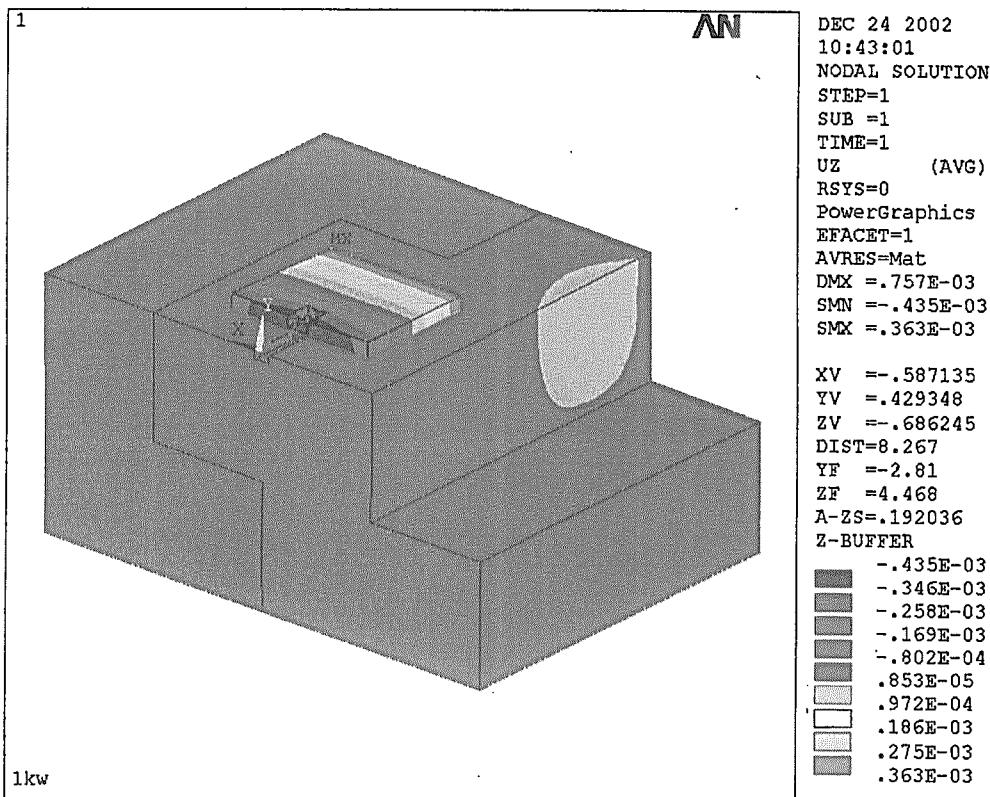


図4.4 モデル全体(1kWビーム) Z軸方向(モデル奥行方向)変位 単位:メートル

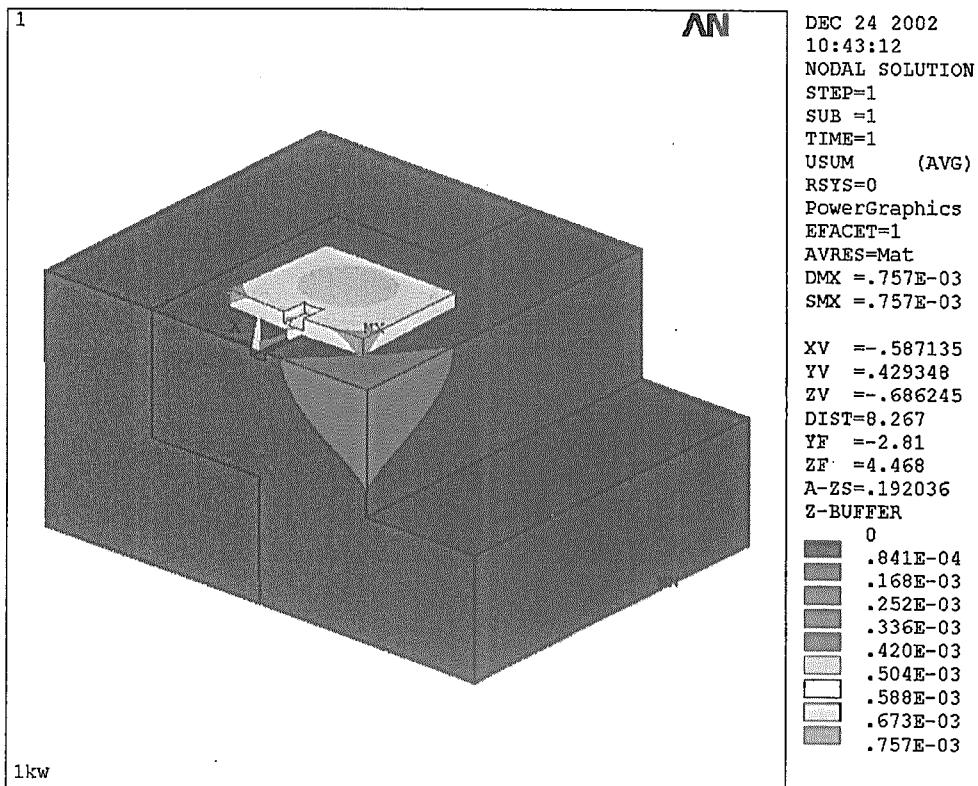


図4.5 モデル全体(1kWビーム) 変位 単位:メートル

This is a blank page.

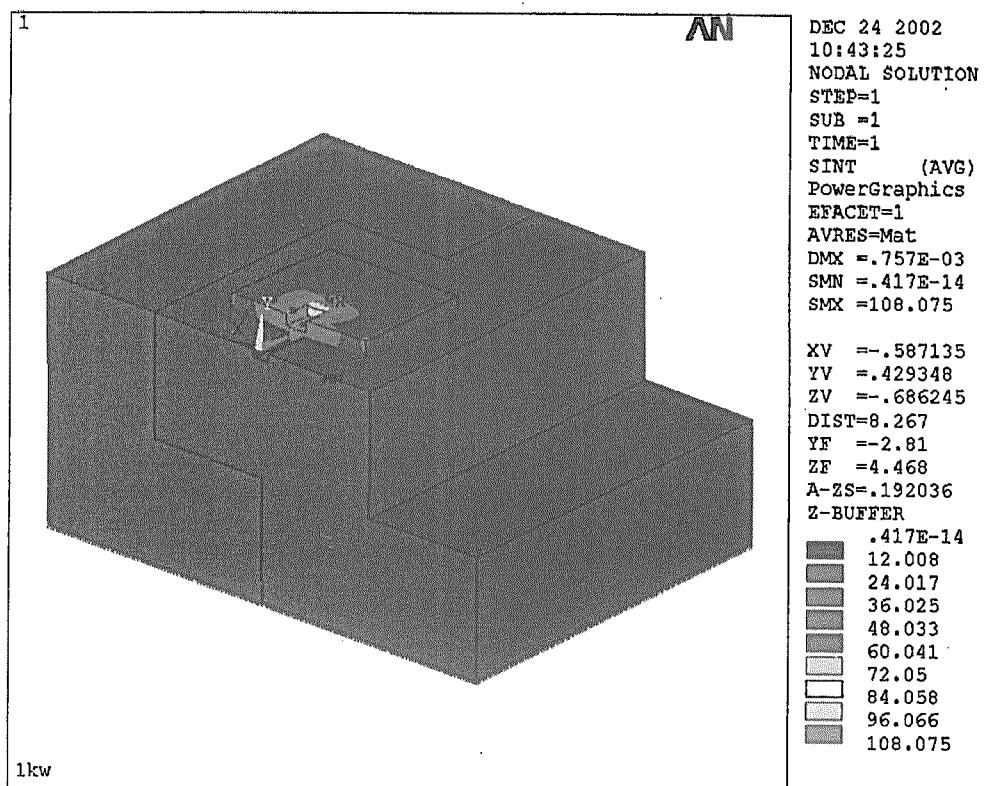


図4.6 モデル全体(1kWビーム) 応力強さ 単位:MPa

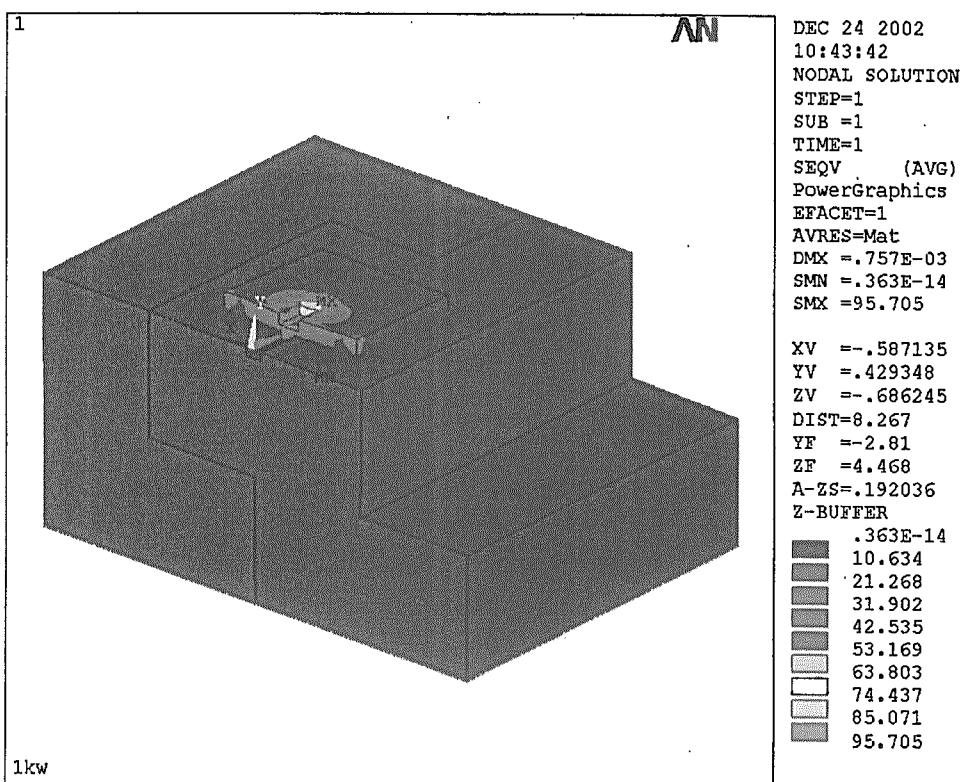


図4.7 モデル全体(1kWビーム) 相当応力 単位:MPa

This is a blank page.

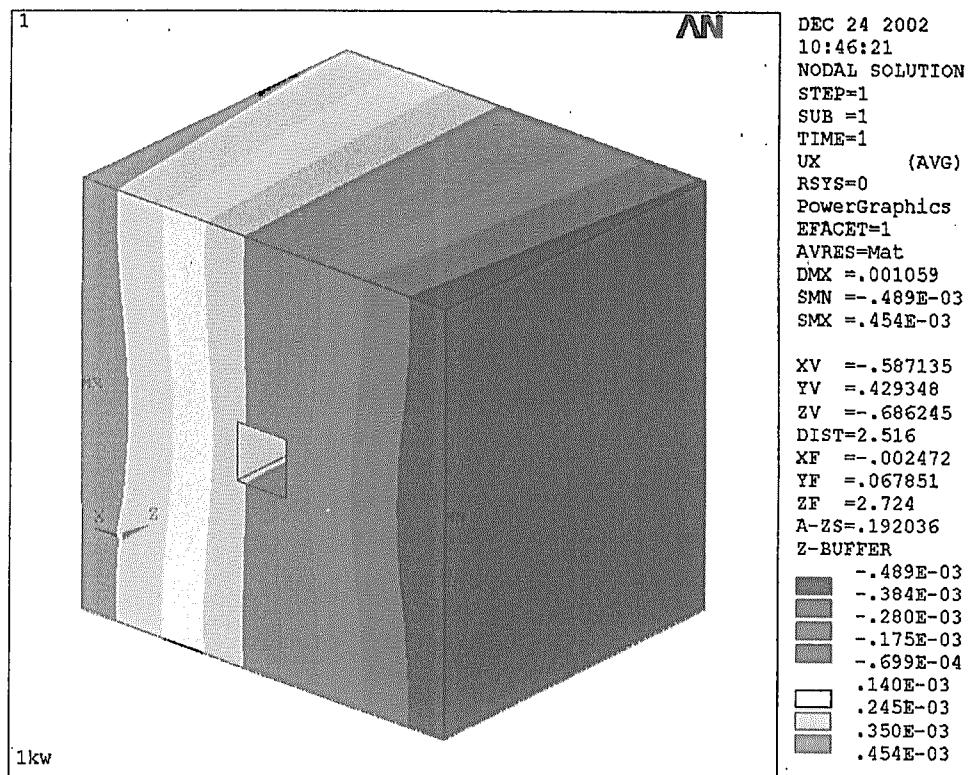


図4.8 鉄部(1kWビーム) X軸方向(モデル左右方向)変位 単位:メートル

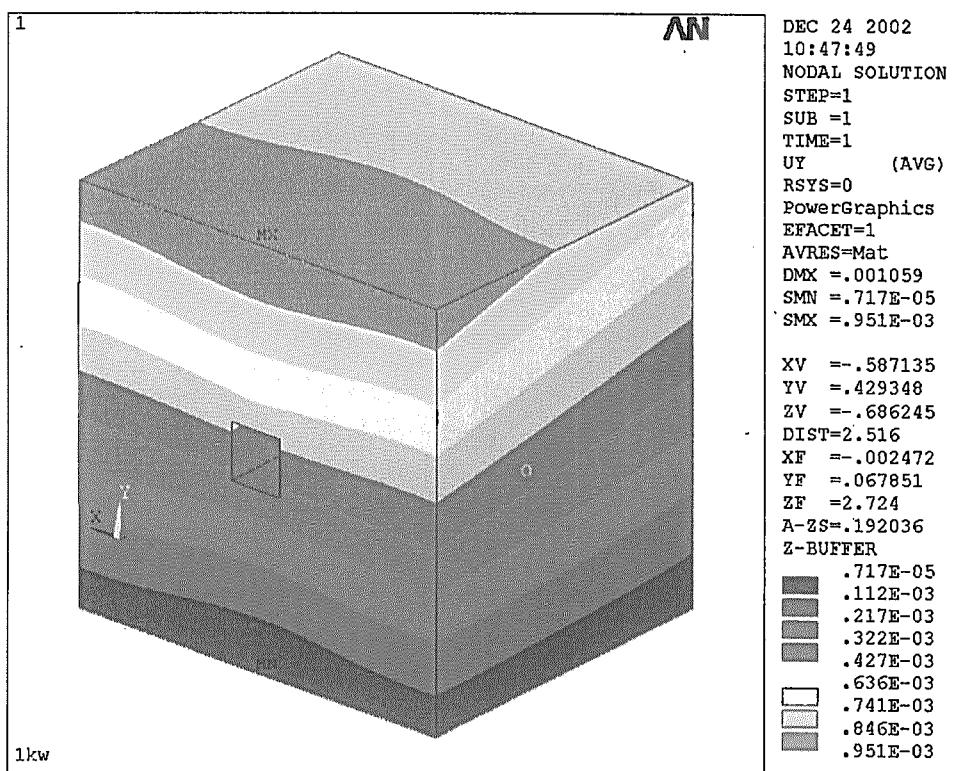


図4.9 鉄部(1kWビーム) Y軸方向(モデル上下方向)変位 単位:メートル

This is a blank page.

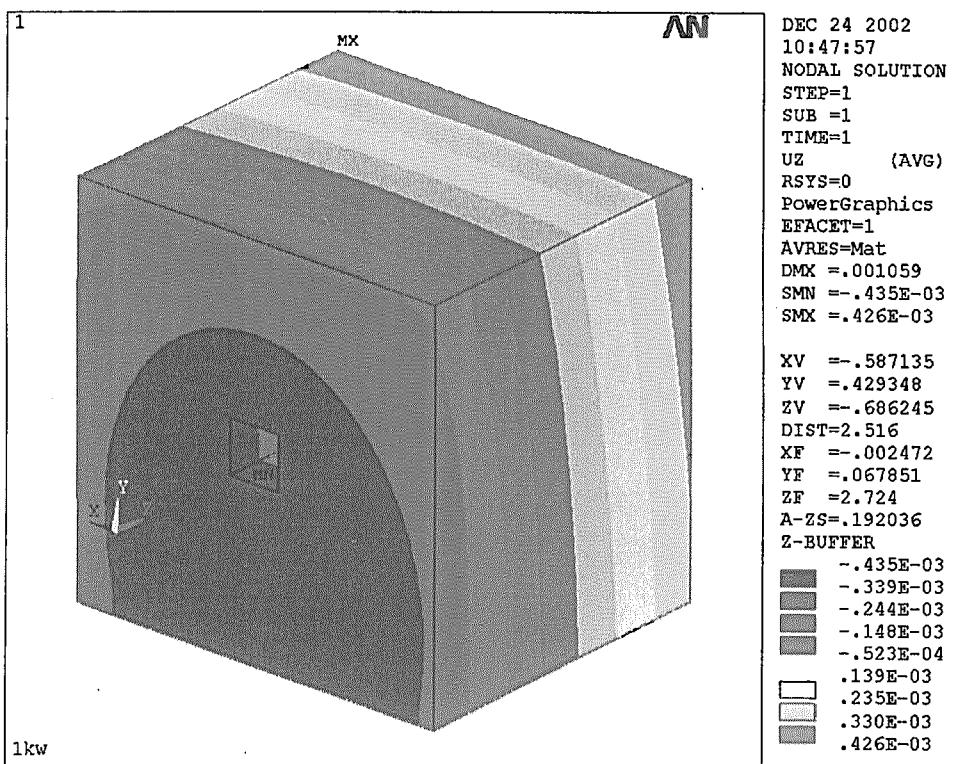


図4.10 鉄部(1kWビーム) Z軸方向(モデル奥行方向)変位 単位:メートル

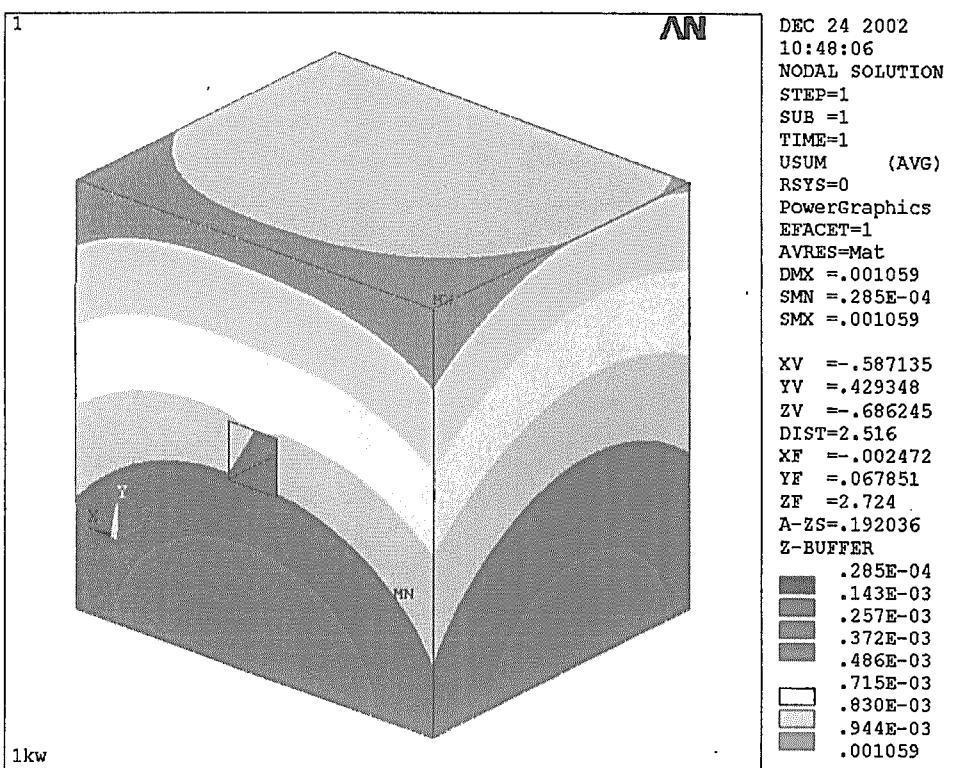


図4.11 鉄部(1kWビーム) 変位 単位:メートル

This is a blank page.

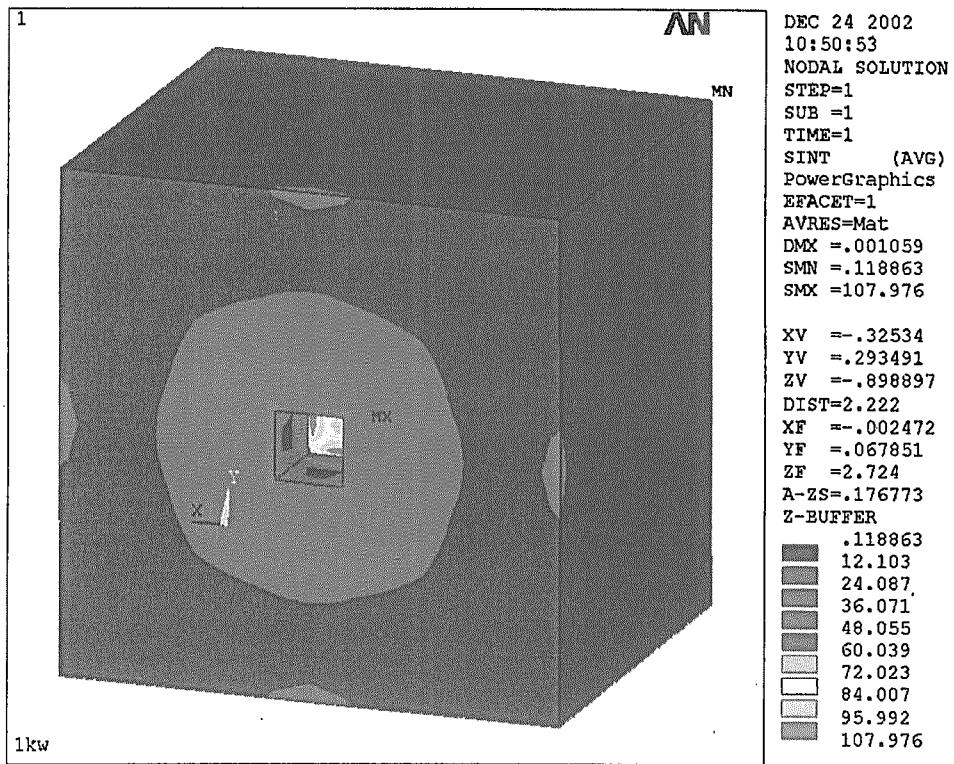


図4.12 鉄部(1kWビーム) 応力強さ 単位:MPa

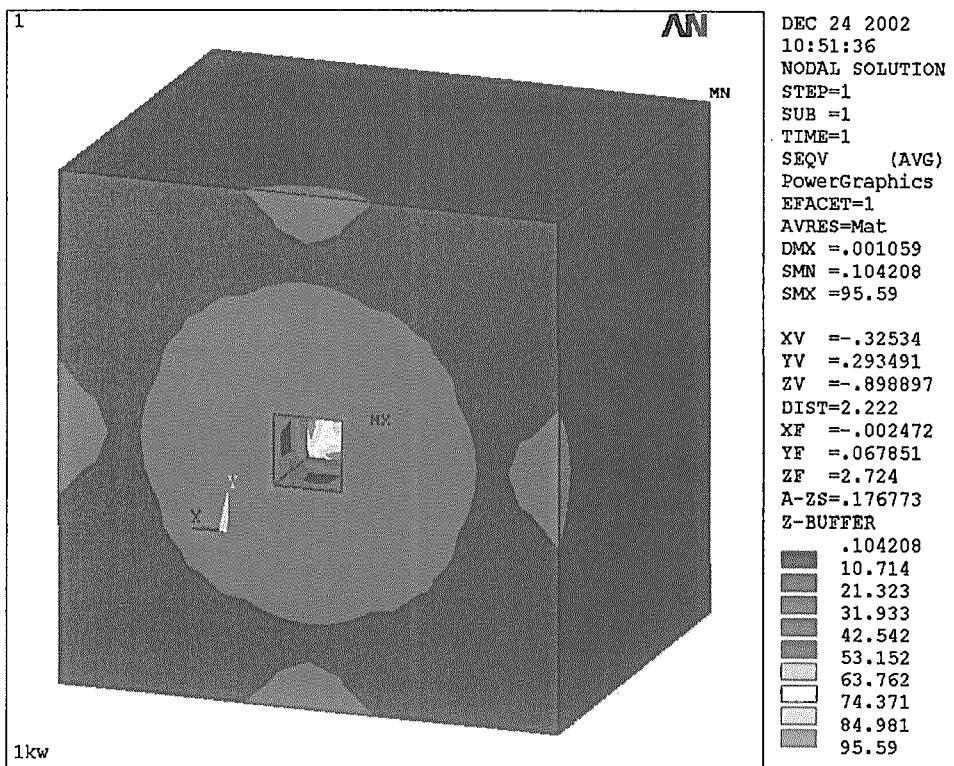


図4.13 鉄部(1kWビーム) 相当応力 単位:MPa

This is a blank page.

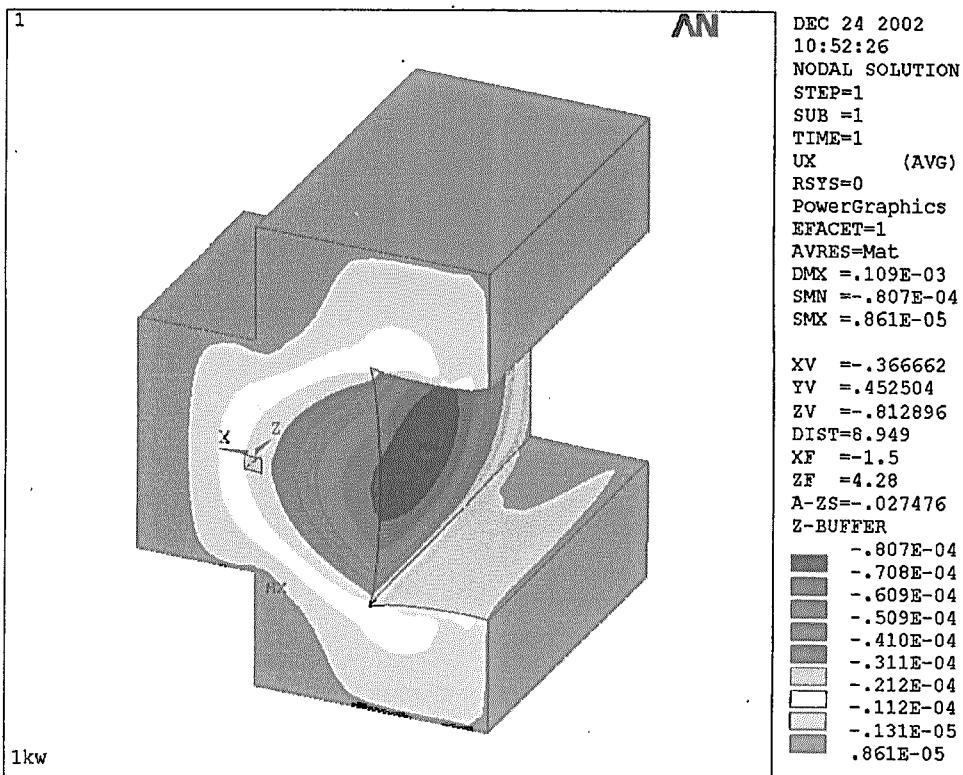


図4.14 コンクリート部(1kWビーム) X軸方向(モデル左右方向)変位 単位:メートル

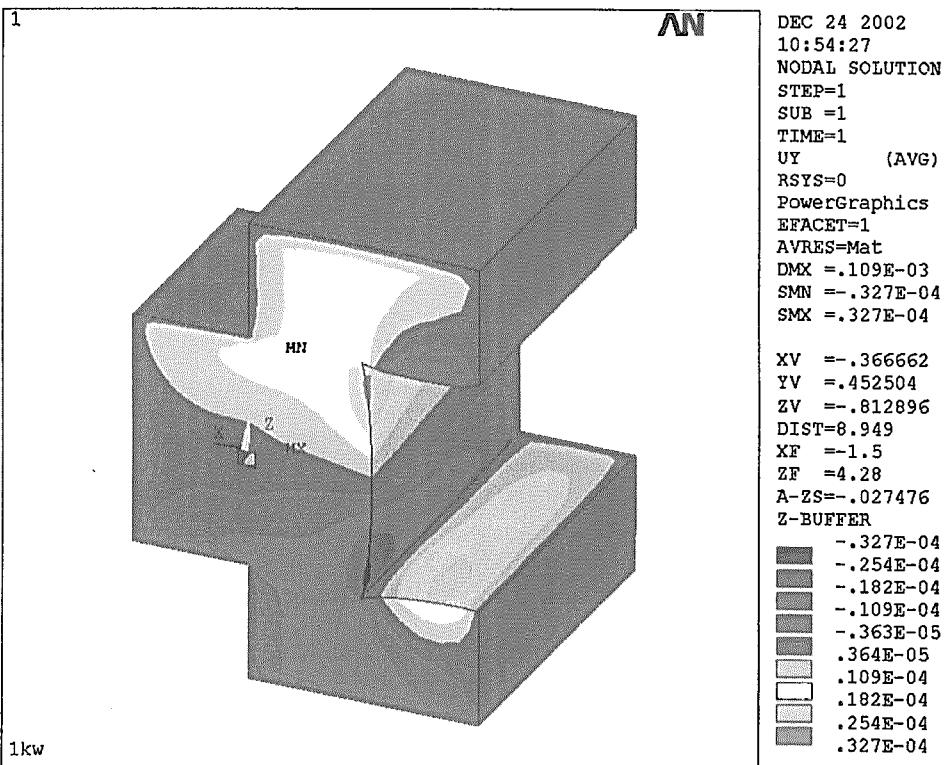


図4.15 コンクリート部(1kWビーム) Y軸方向(モデル上下方向)変位 単位:メートル

This is a blank page.

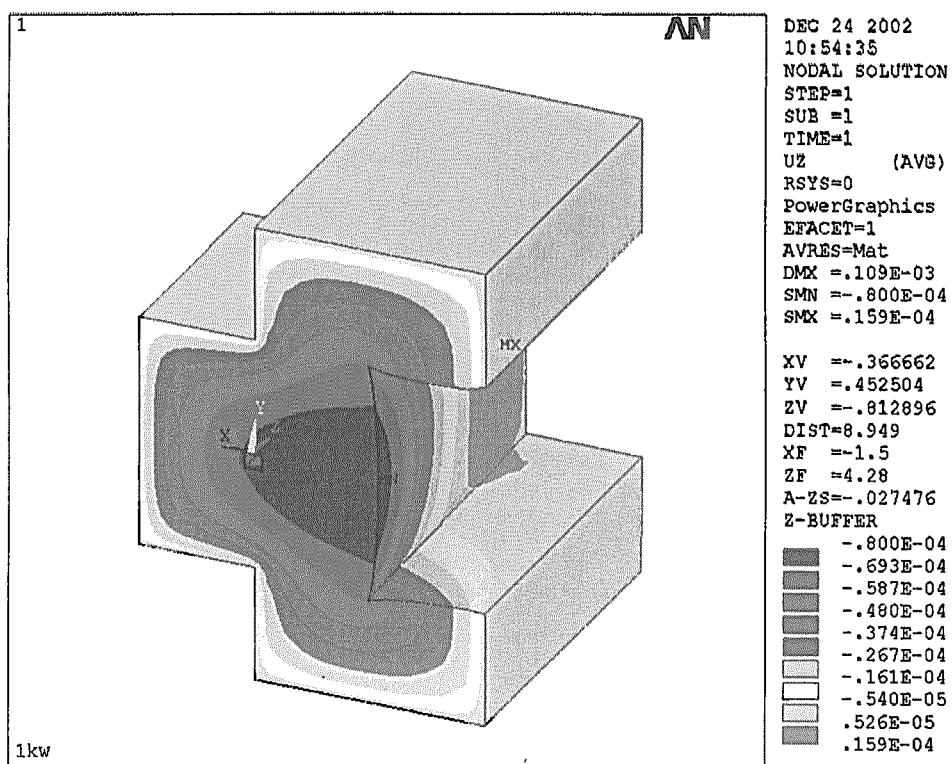


図4.16 コンクリート部(1kWビーム) Z軸方向(モデル奥行方向)変位 単位:メートル

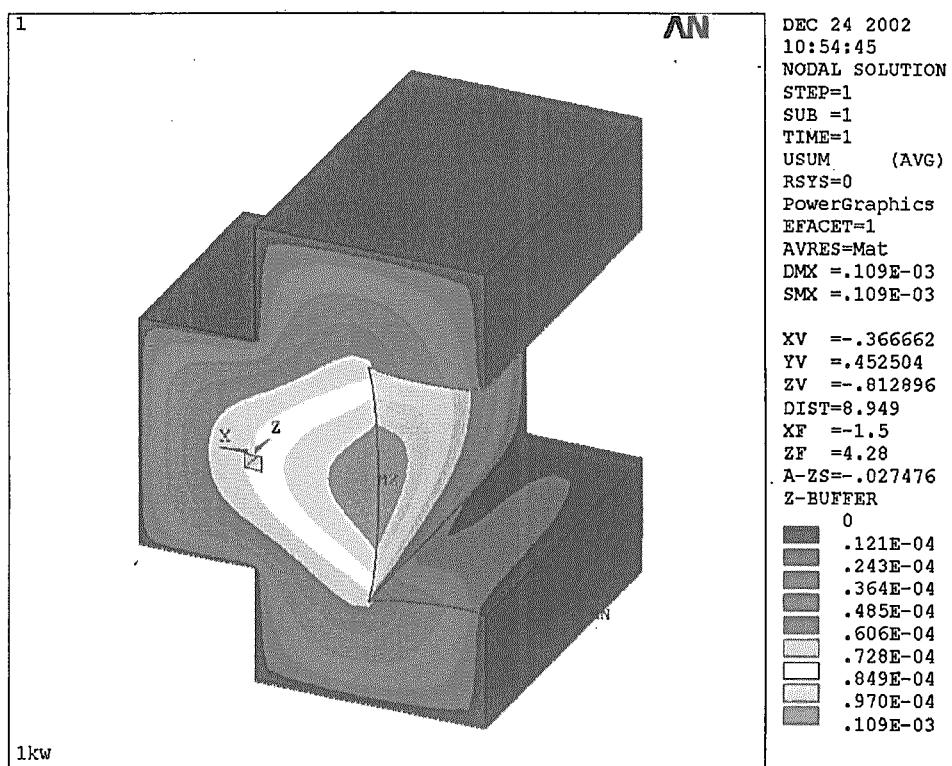


図4.17 コンクリート部(1kWビーム) 変位 単位:メートル

This is a blank page.

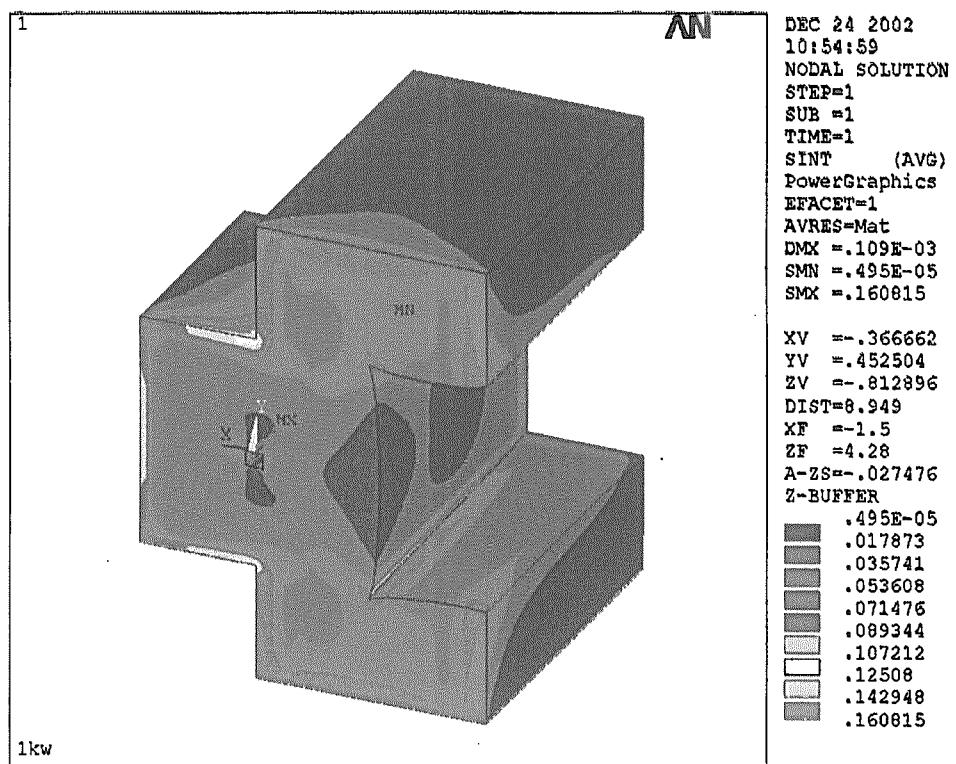


図4.18 コンクリート部(1kWビーム) 応力強さ 単位:MPa

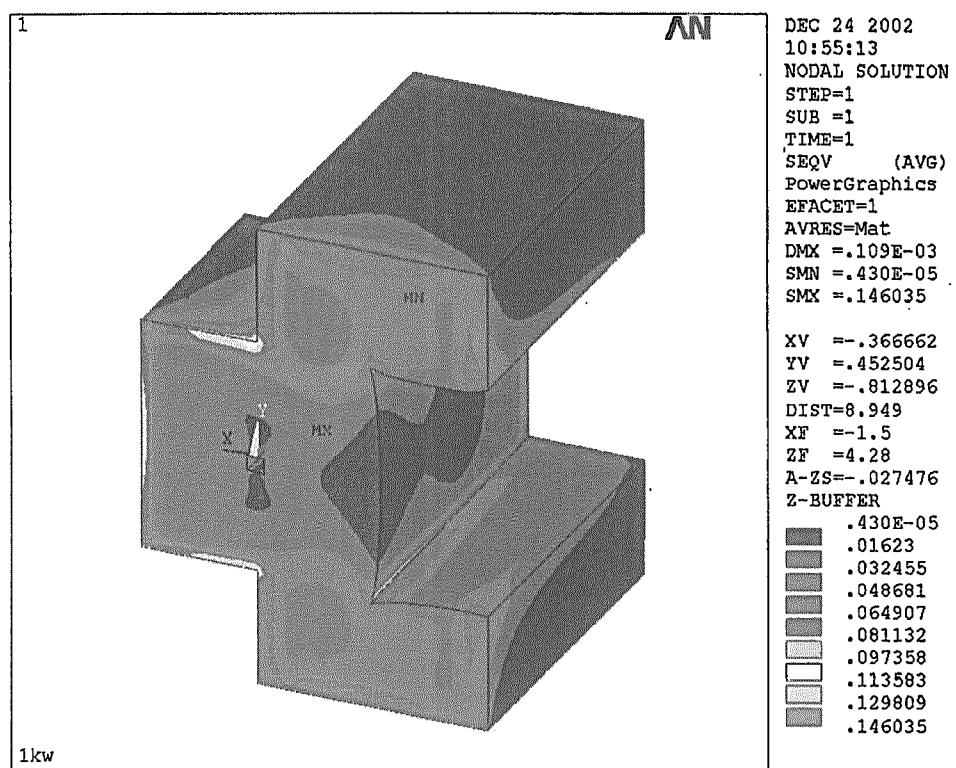


図4.19 コンクリート部(1kWビーム) 相当応力 単位:MPa

This is a blank page.

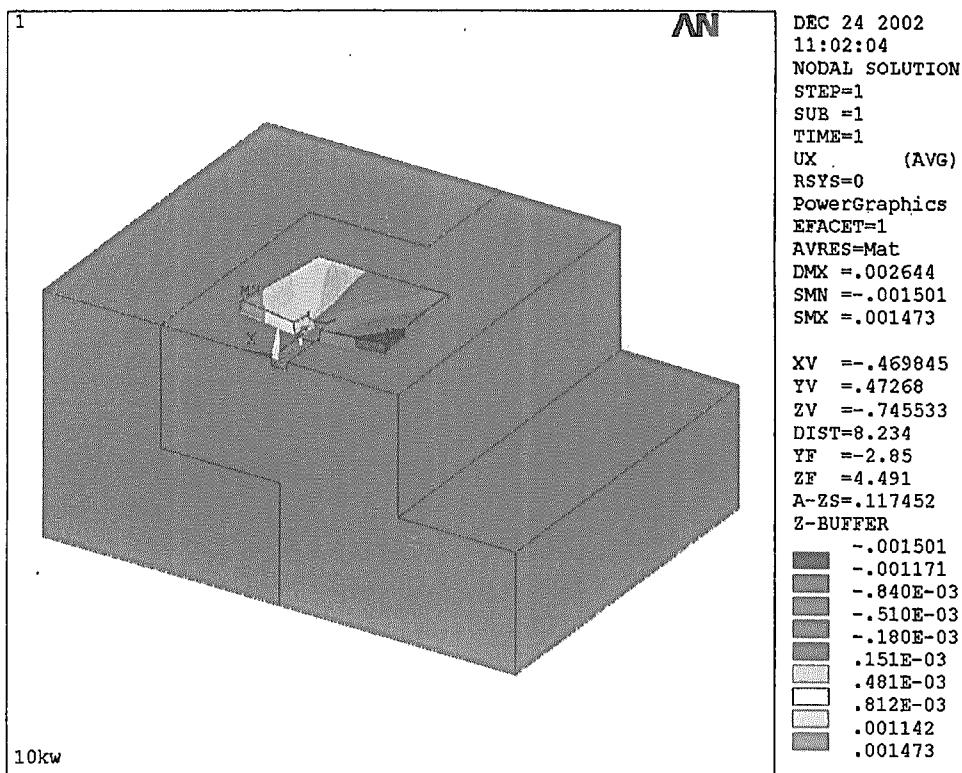


図4.20 モデル全体(10kWビーム) X軸方向(モデル左右方向)変位 単位:メートル

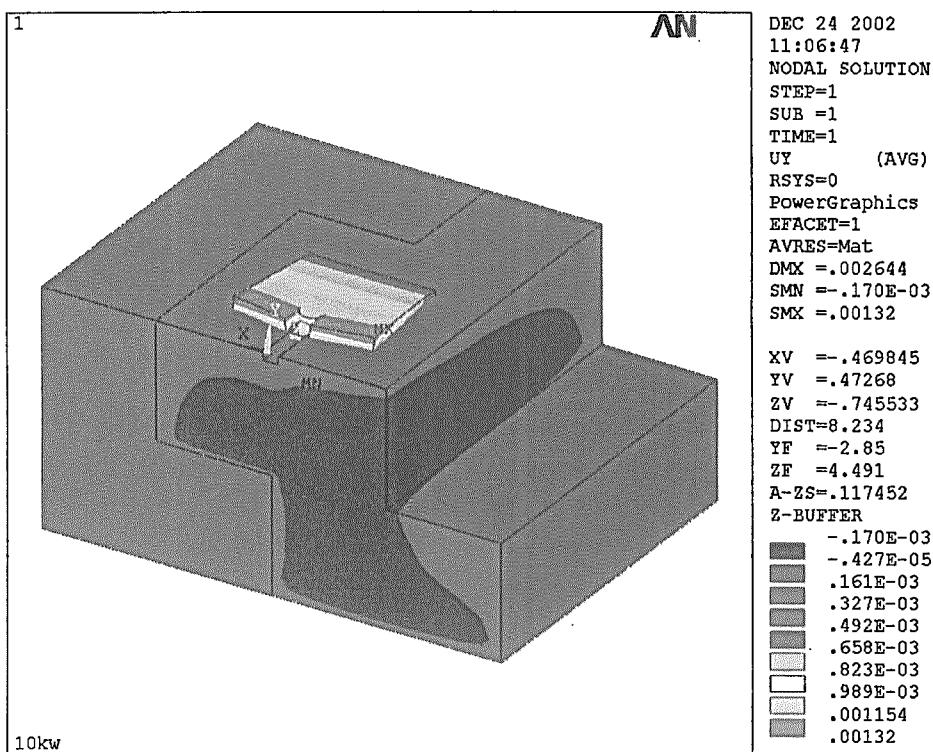


図4.21 モデル全体(10kWビーム) Y軸方向(モデル上下方向)変位 単位:メートル

This is a blank page.

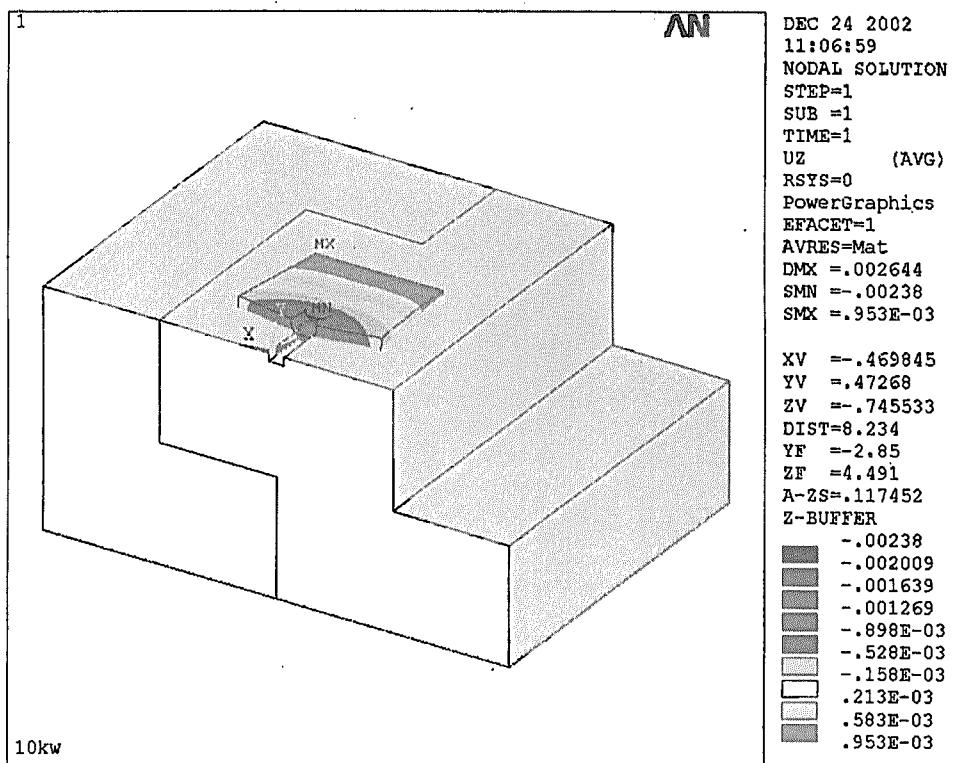


図4.22 モデル全体(10kWビーム) Z軸方向(モデル奥行方向)変位 単位:メートル

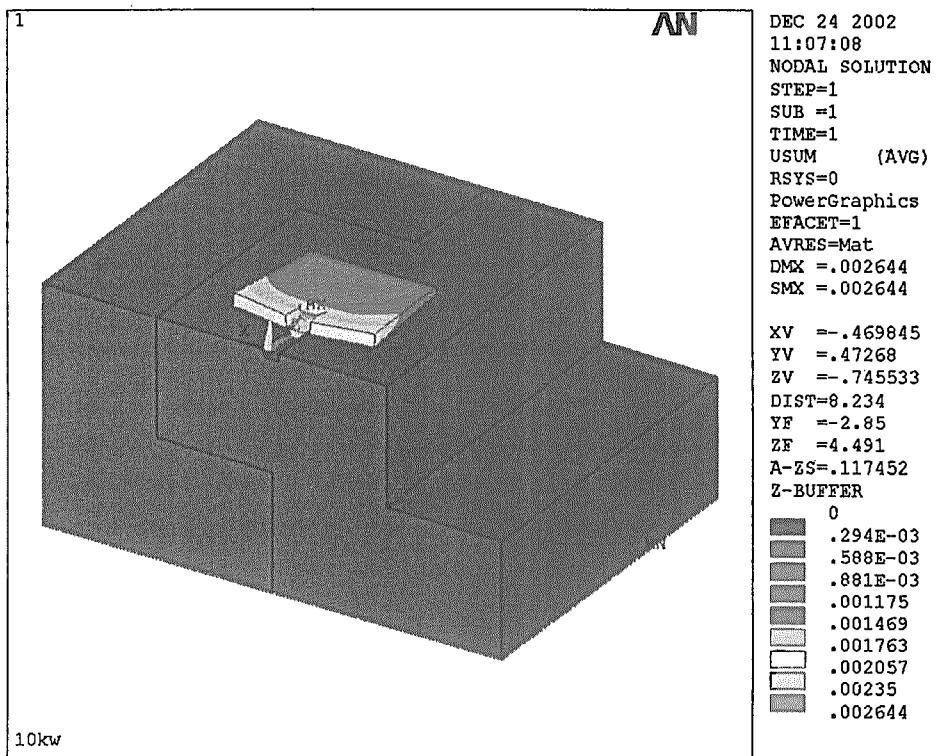


図4.23 モデル全体(10kWビーム) 変位 単位:メートル

This is a blank page.

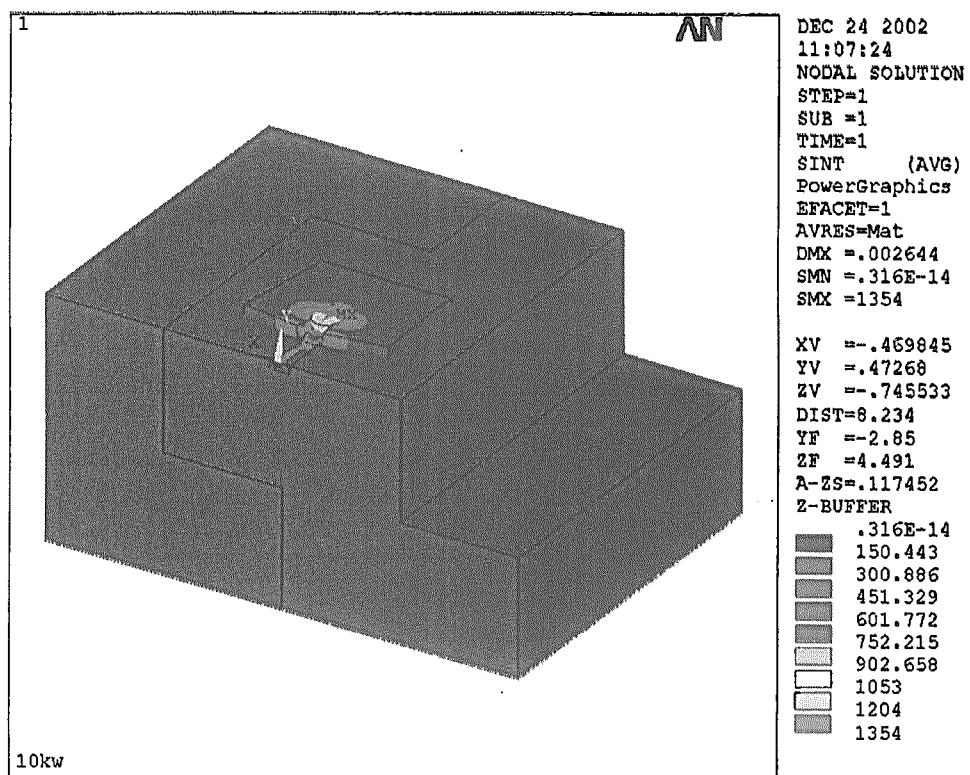


図4.24 モデル全体(10kWビーム) 応力強さ 単位:MPa

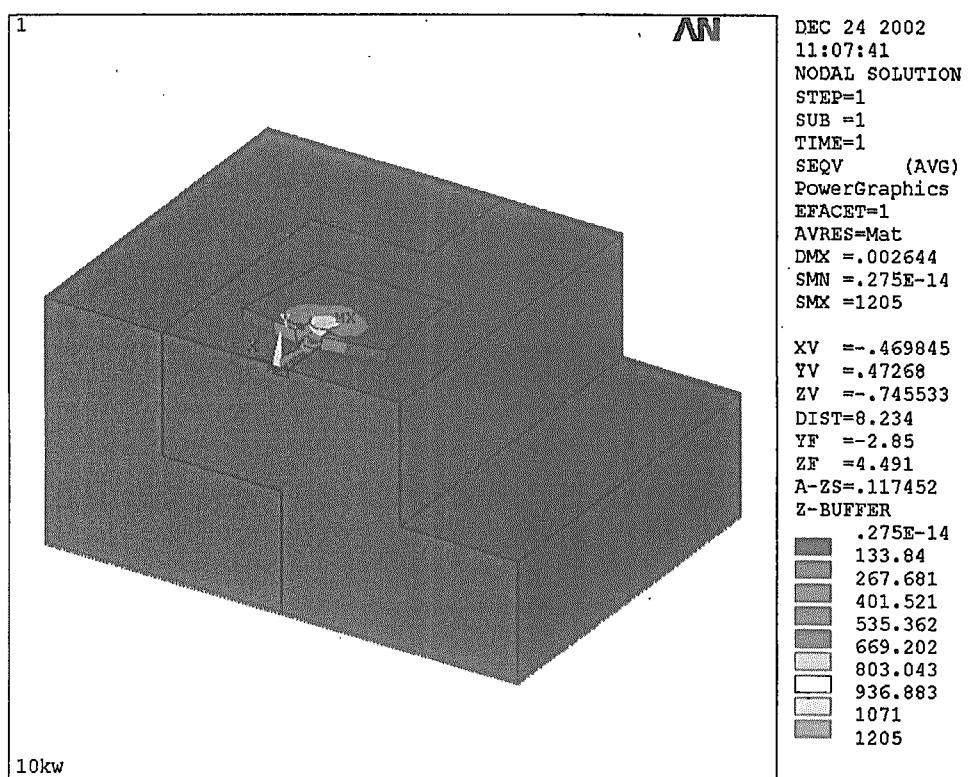


図4.25 モデル全体(10kWビーム) 相当応力 単位:MPa

This is a blank page.

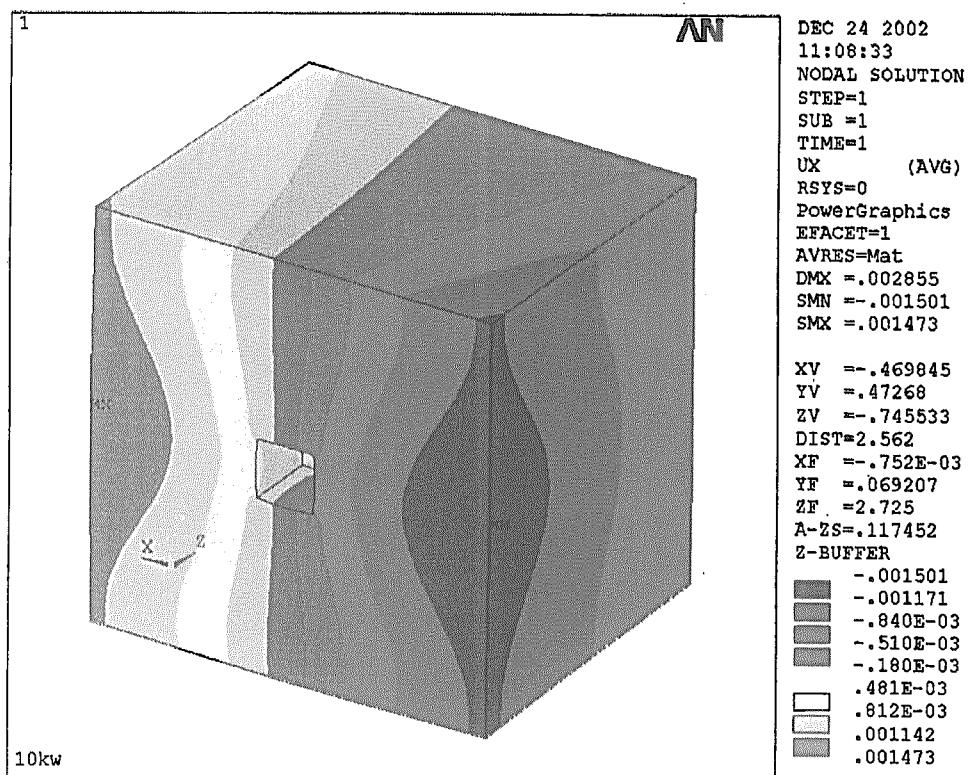


図4.26 鉄部(10kWビーム) X軸方向(モデル左右方向)変位 単位:メートル

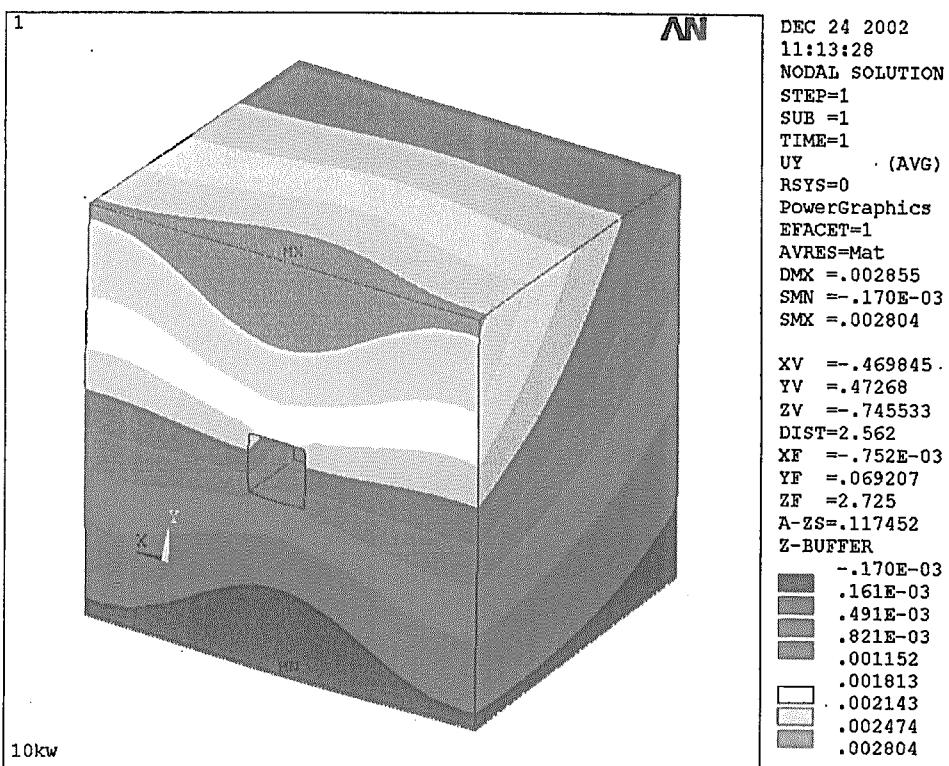


図4.27 鉄部(10kWビーム) Y軸方向(モデル上下方向)変位 単位:メートル

This is a blank page.

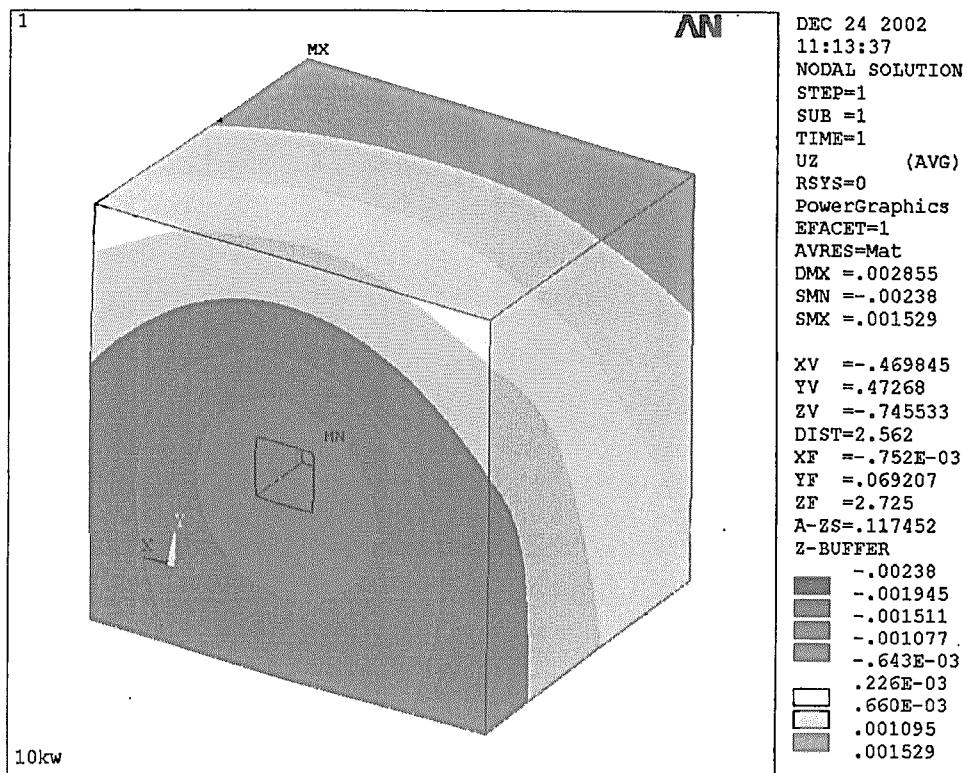


図4.28 鉄部(10kWビーム) Z軸方向(モデル奥行方向)変位 単位:メートル

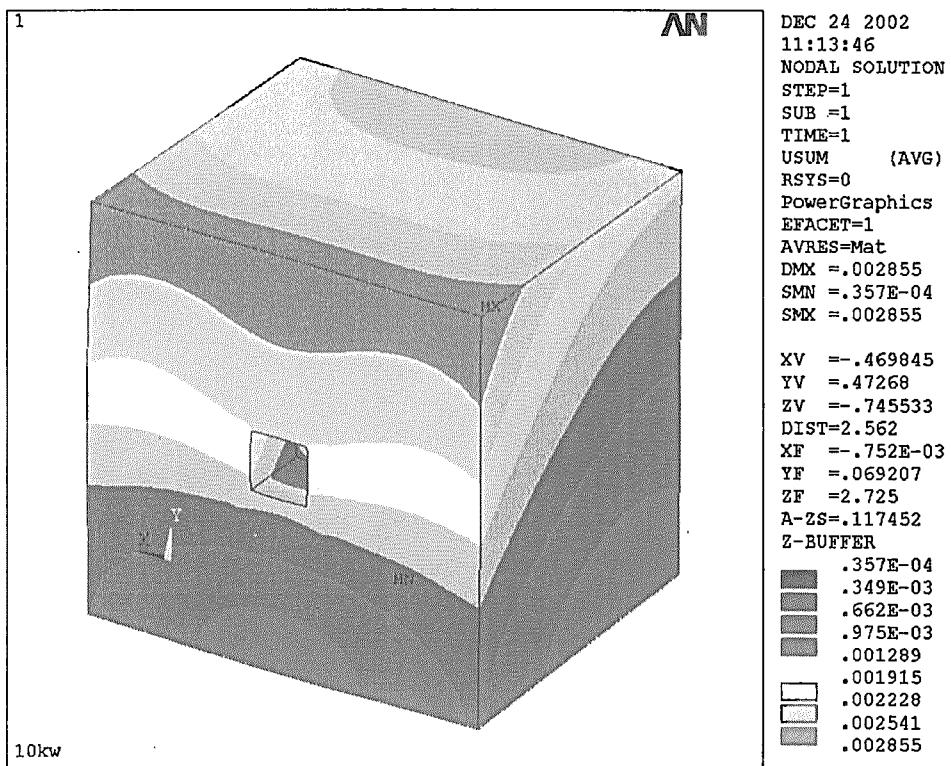


図4.29 鉄部(10kWビーム) 変位 単位:メートル

This is a blank page.

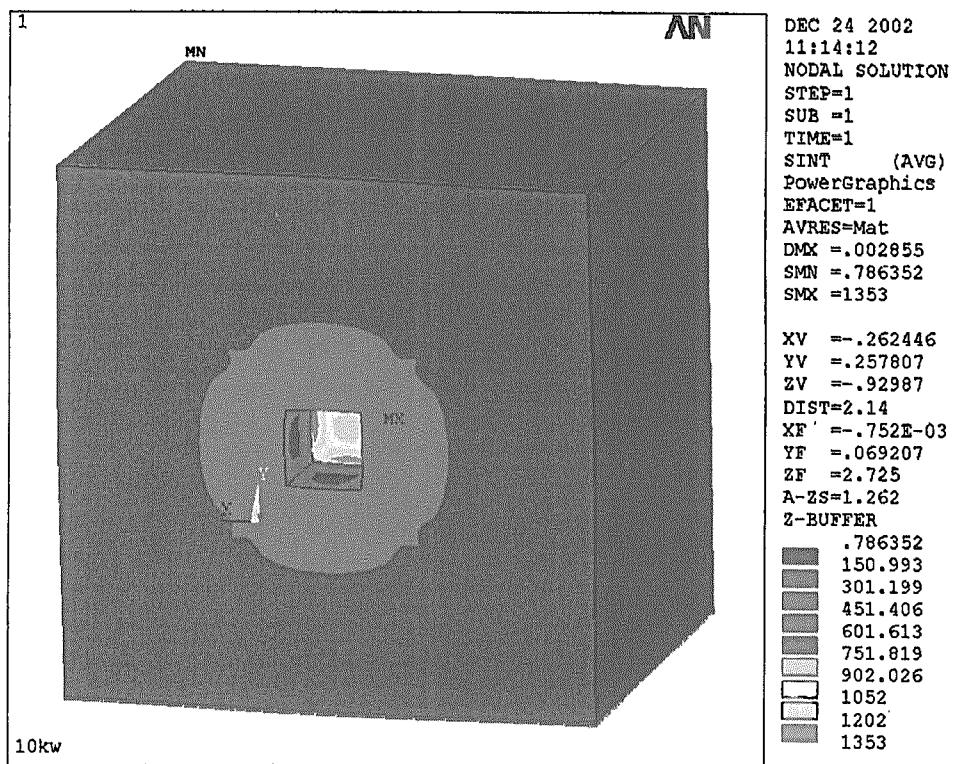


図4.30 鉄部(10kWビーム) 応力強さ 単位:MPa

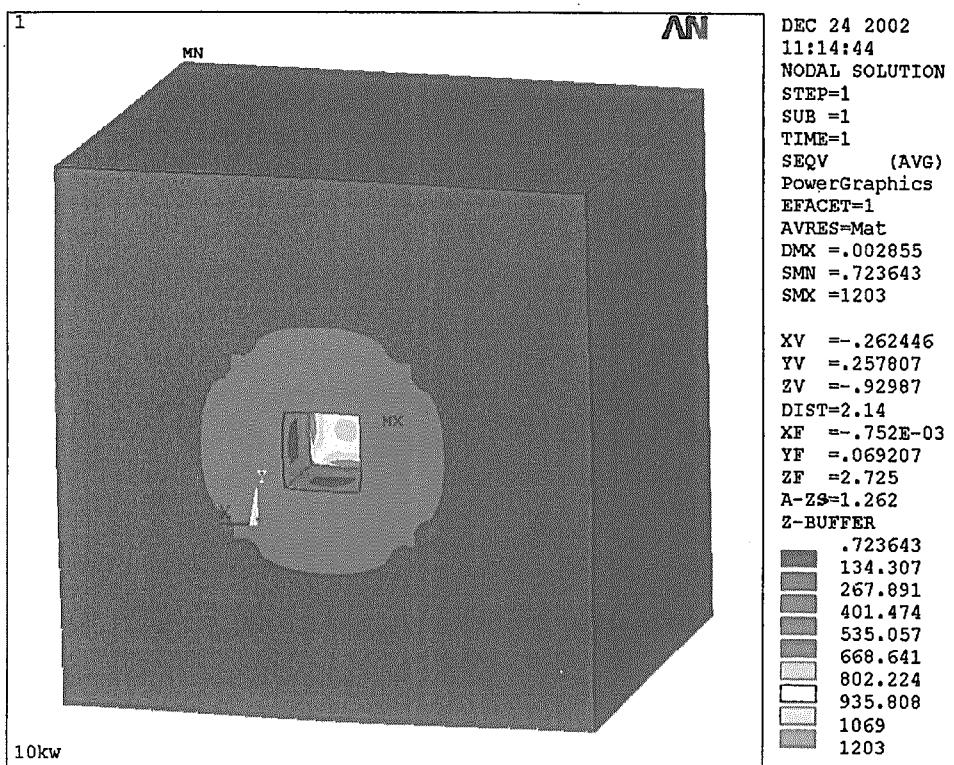


図4.31 鉄部(10kWビーム) 相当応力 単位:MPa

This is a blank page.

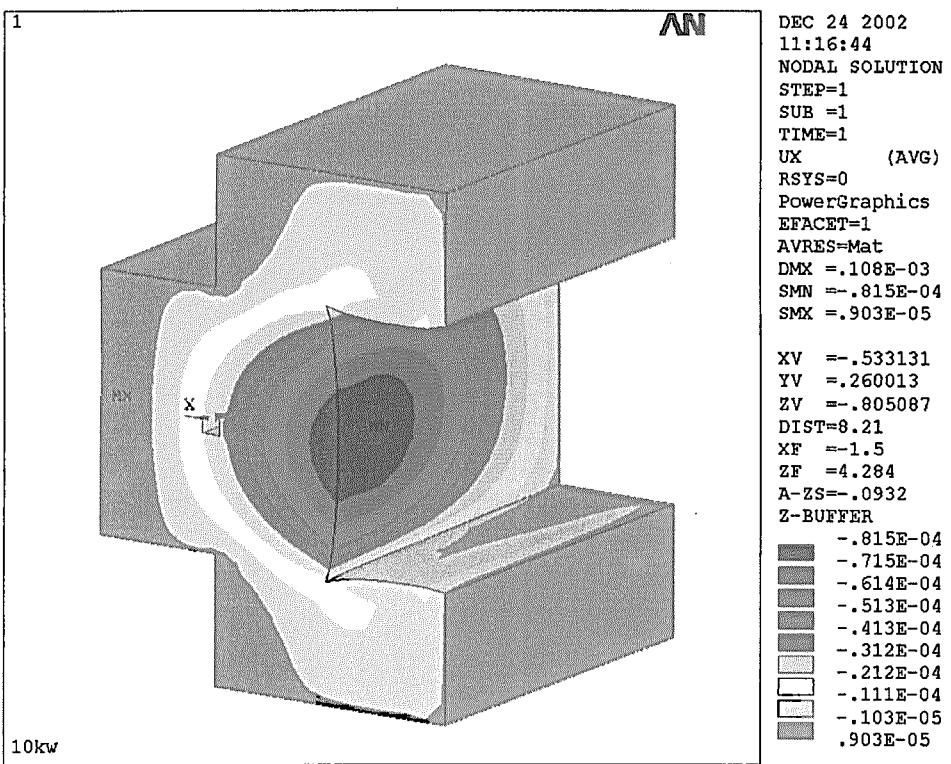


図4.32 コンクリート部(10kWビーム) X軸方向(モデル左右方向)変位 単位:メートル

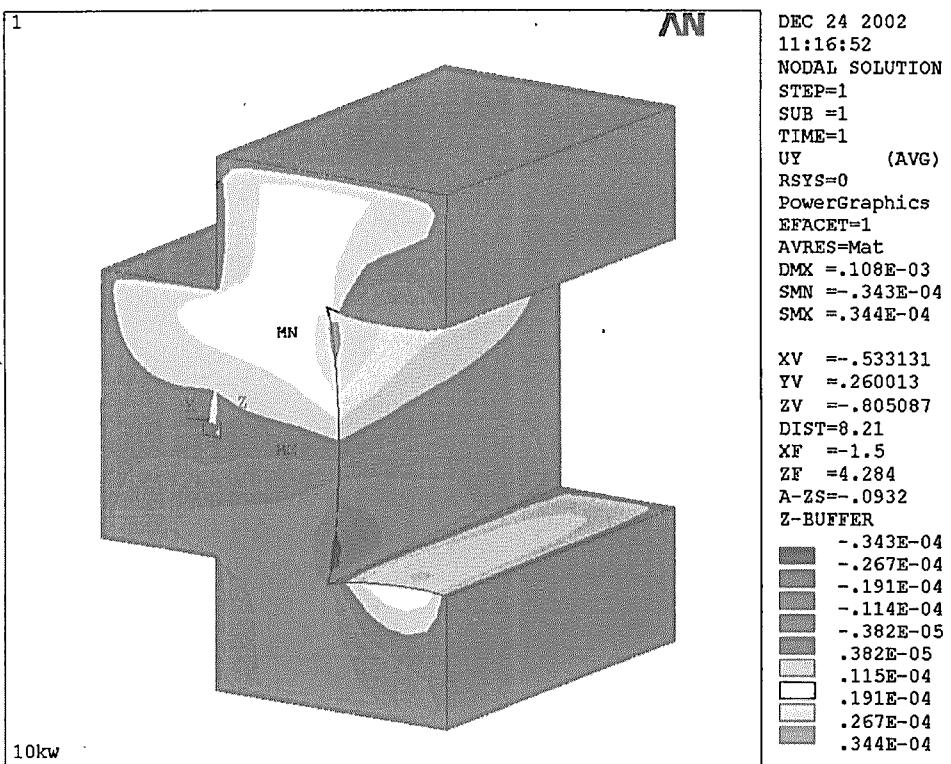


図4.33 コンクリート部(10kWビーム) Y軸方向(モデル上下方向)変位 単位:メートル

This is a blank page.

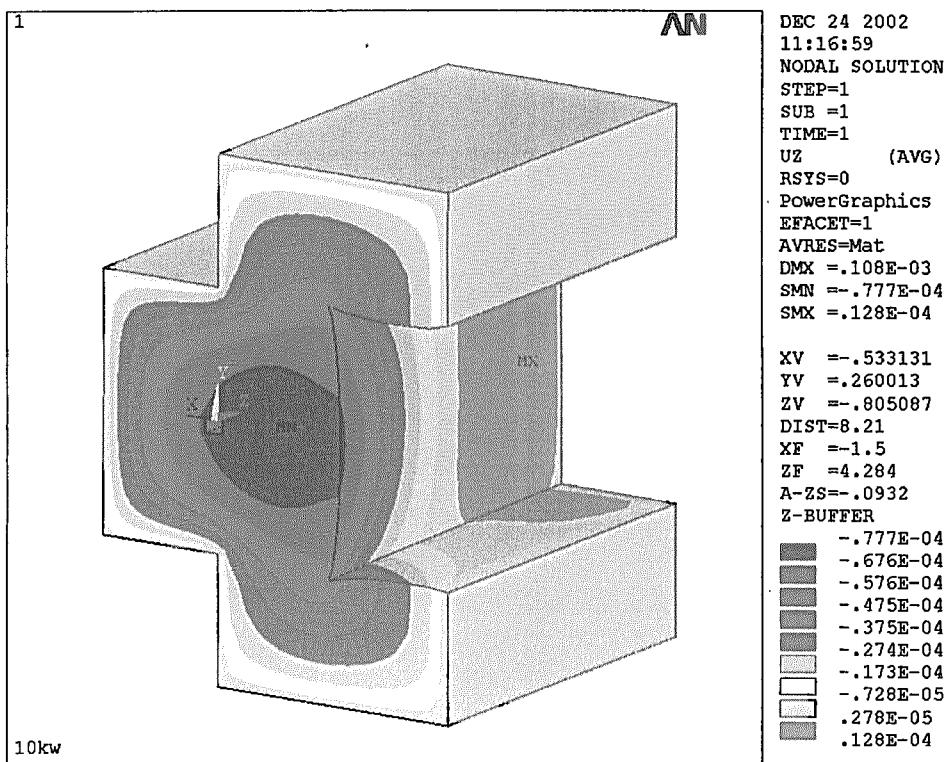


図4.34 コンクリート部(10kWビーム) Z軸方向(モデル奥行方向)変位 単位:メートル

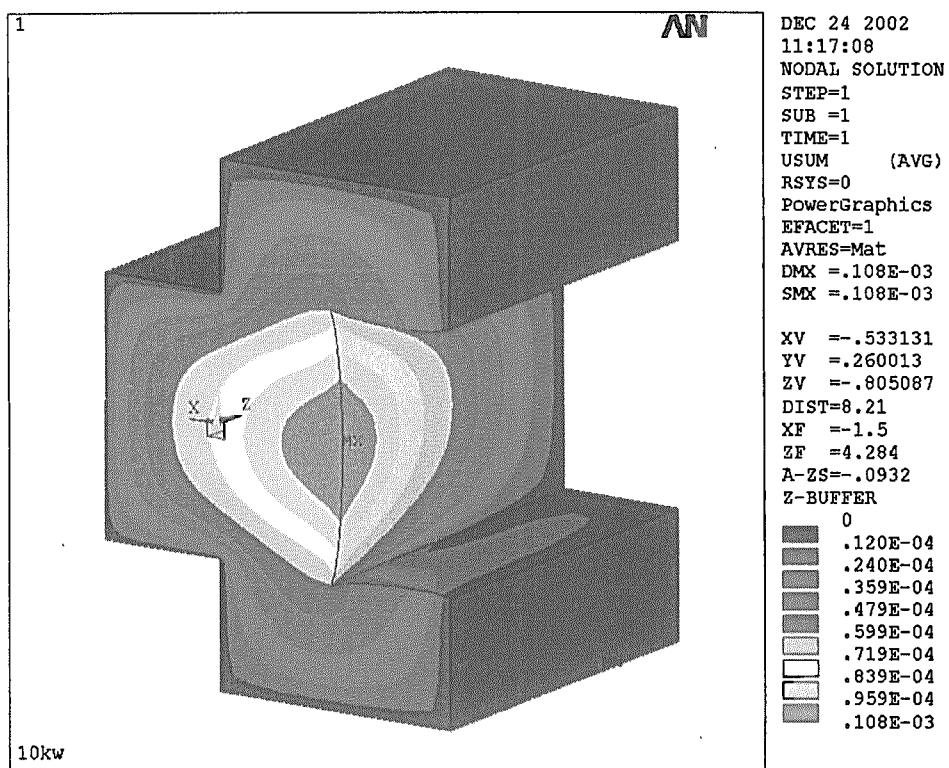


図4.35 コンクリート部(10kWビーム) 変位 単位:メートル

This is a blank page.

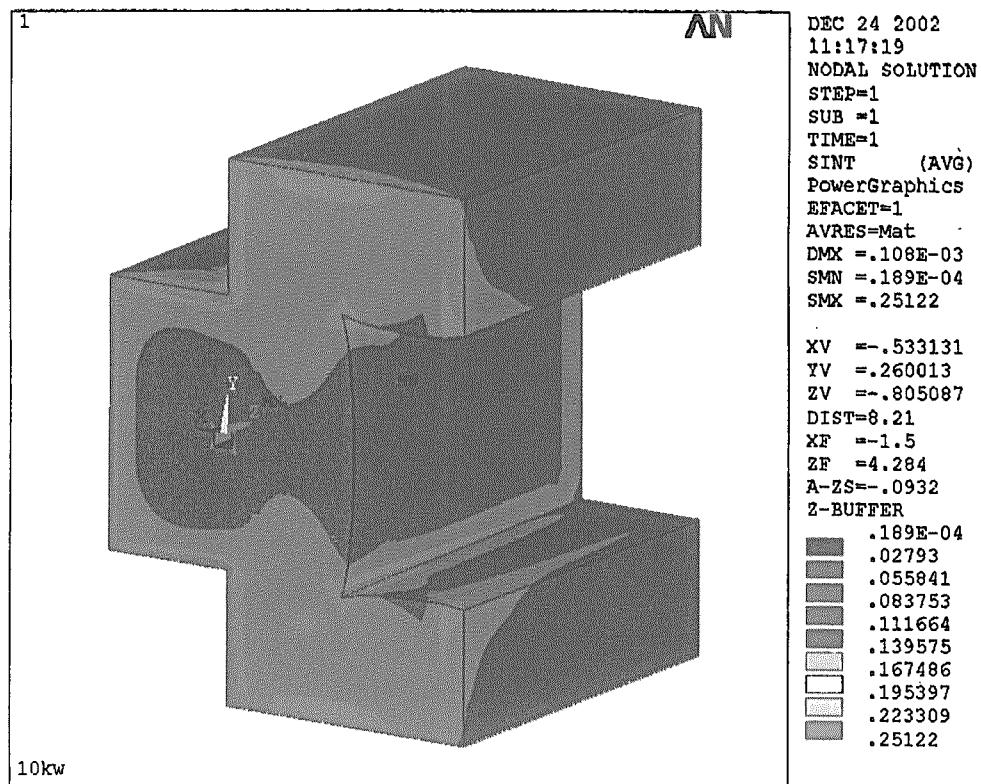


図4.36 コンクリート部(10kWビーム) 応力強さ 単位:MPa

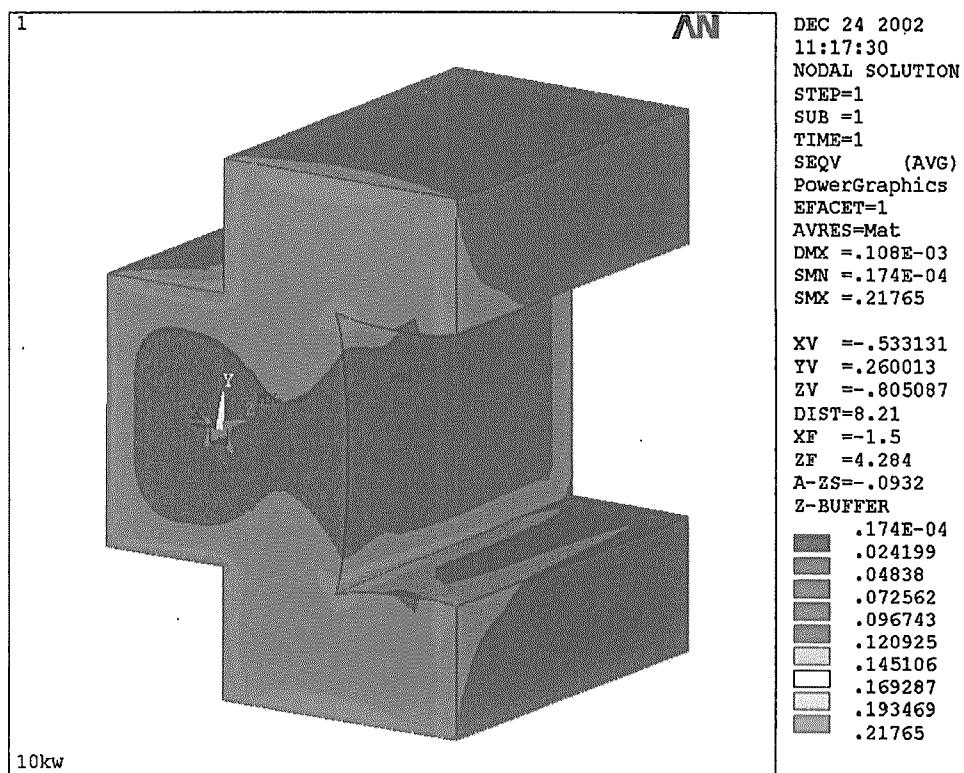


図4.37 コンクリート部(10kWビーム) 相当応力 単位:MPa

This is a blank page.

## 5 結言

1kW の陽子ビームがビームダンプに廃棄される場合の温度分布及び熱応力の評価を行った。その結果、6 サイクル（1 サイクルは 1kW ビーム照射時間 3 週間と 5 日間の照射停止）156 日間のビーム条件において、コンクリート内の最高温度は約 320K であり、コンクリート駆体に影響を与えるとされる 333K 以下であるので、今回検討した入射ビームダンプの形状で特に大きな問題はないと考えられる。

10kW ビーム照射では、10 日照射後 5 日間照射停止条件においてコンクリート内温度が 360K 以上になることがわかった。この結果から、10kW のビームを照射する場合は、鉄部からの熱伝導と安全を考慮すると 5 日間（5 日間照射終了時のコンクリート内最高温度は 317K。その後鉄部からの伝熱を考慮するとこのくらいが妥当である。）のビーム照射が限度である。

一方、熱応力については 1kW ビーム条件下では鉄部で、相当応力が許容応力（約 300MPa）よりもはるかに低い 96MPa、最大変位が約 1mm、コンクリート部では相当応力が 0.146MPa、最大変位は約 0.1mm であった。ただし、これらの値は物性値や拘束条件に大きく依存するため、今後実際施工に使用した物性値や、施工による拘束条件を考慮した構造解析を行う。また、10kW ビーム条件下では鉄部で相当応力が 1203MPa、最大変位が約 3mm と大きく増大した。相当応力については許容応力を大きく超えているため、現状の構造では成立しないことが分かった。

謝辞

本報告をまとめるに当つて親切丁寧な助言して頂いた中性子施設開発グループ 日野竜太郎氏、春日井好己氏に厚くお礼申しあげます。

参考文献

- [1] The joint project team of JAERI and KEK, "The Joint Project for High Intensity Proton Accelerators", JAERI-Tech 2000-003(2000).
- [2] H.Yokomizo *et al*, "Overview of 3GeV Rapid Cycle Synchrotron for JAERI-KEK Joint Project", the proceedings of ICANS-XV, Tsukuba, Japan, JAERI-Conf 2001-002, KEK Proceedings 2000-22, March 2001.
- [3] OHO'96 pVII-1.
- [4] OHO'01 p15-8.
- [5] E.Acerbi *et al* ; Lett. Nuovo Cimento 10, 598 (1974).
- [6] Robert C. Webber *et al* ;IEEE Trans., vol. NS-26 No.3(1979)
- [7] M.S.Gulley *et al* ;Phys. Rev. A53, 3201 (1996).
- [8] N.V.Mokhov, "The MARS Code System User's Guide Version 13(95)", FERMILAB-FN-628(1995).
- [9] ANSYS 中級セミナー , サイバネットシステム株式会社(2001).
- [10] ANSYS 伝熱解析セミナー , サイバネットシステム株式会社(2000).
- [11] 粉川広行 : 私信.
- [12] 「地盤工学ハンドブック」, 地盤工学会 , p1502 (1999).

## 国際単位系 (SI) と換算表

表 1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表 3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバー	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表 2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表 5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表 1~5 は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eV および 1u の値は CODATA の 1986 年推奨値によった。
- 表 4 には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- bar は、JIS では流体の圧力を表わす場合に限り表 2 のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHg を表 2 のカテゴリーに入れている。

表 4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

### 換 算 表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233	
0.101325	1.03323	1	760	14.6959	
1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>	
6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1	

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>
9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	
3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>	
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	
1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	
1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1	

$$1 \text{ cal} = 4.18605 \text{ J (計量法)}$$

$$= 4.184 \text{ J (熱化学)}$$

$$= 4.1855 \text{ J (15°C)}$$

$$= 4.1868 \text{ J (国際蒸気表)}$$

$$\text{仕事率 } 1 \text{ PS (仮馬力)}$$

$$= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$$

$$= 735.499 \text{ W}$$

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
3.7 × 10 <sup>10</sup>	1	

吸収線量	Gy	rad
	1	100
0.01	1	

照射線量	C/kg	R
	1	3876
2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1	

線量当量	Sv	rem
	1	100
0.01	1	



古紙配合率100%再生紙を使用しています