JAEA-Data/Code
2013-011

JAEA-Data/Code

廃ゼオライトの長期保管方策の検討

―水素拡散／燃焼影響評価解析システムの整備―

Study on Long-term Storage Method for Spent Zeolite Vessels
-Establishment of Code System for Analyzing Hydrogen Diffusion, Burning and Explosion, and Its Impact-

寺田 敦彦　竹上 弘彰　上地 優　日野 竜太郎

Atsuhiko TERADA, Hiroaki TAKEGAMI, Yu KAMIJI and Ryutaro HINO

大洗研究開発センター
大洗研福島技術開発特別チーム

Fukushima Project Team
Oarai Research and Development Center

March 2014

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, 2014

JAEA-Data/Code 2013-011

廃ゼオライトの長期保管方策の検討
－水素拡散/燃焼影響評価解析システムの整備－

日本原子力研究開発機構
大洗研究開発センター
大洗研福島技術開発特別チーム
寺田　敦彦、竹上　弘彰、上地　優、日野竜太郎[+1]

(2013 年 6 月 21 日　受理)

福島第一原子力発電所の事故では、汚染滞留水を淡水化するため、放射能源であるセシウムをゼオライトで吸着し除去する汚染水処理システムが稼働している。ゼオライトは吸着塔に充填して使用され、使用済みの廃ゼオライトは吸着塔に充填したまま長期保管する。このとき、廃ゼオライトに吸着された水分や吸着塔内の残留水が放射線分解して水素と酸素を発生する。そこで、水素拡散挙動や、万が一の水素燃焼・爆発に対する安全対策の妥当性を確認するため、詳細な水素濃度/温度分布を基に、水素燃焼・爆発事故時の事象推移とそれらの影響を解析する水素拡散/燃焼影響評価解析システムを整備した。本報告では、整備した解析システムの概要、機能確認のために実施した予備解析評価結果を紹介する。

大洗研究開発センター：〒311-1393　茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002
+1　原子力水素・熱利用研究センター

JAEA-Data/Code 2013-011

Study on Long-term Storage Method for Spent Zeolite Vessels
- Establishment of Code System for Analyzing Hydrogen Diffusion, Burning and Explosion, and Its Impact -

Atsuhiko TERADA, Hiroaki TAKEGAMI, Yu KAMIJI
and Ryutaro HINO[+1]

Fukushima Project Team
Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi,Higashiibaraki-gun,Ibaraki-ken
(Received June 21, 2013)

In the accident of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, the high-level contaminated water processing system with zeolite vessel made by KURION et al. is operating for treatment of contaminated water mixed with seawater. A spent KURION zeolite vessel is detached from the water processing system and brought to exclusive storage yards. Although water in the vessel is drained before storage, combustible hydrogen could be produced via radiolysis of water absorbed in the zeolite and the small amount of water remaining at the bottom of the vessel.

An analytical code system available for hydrogen diffusion, burning and explosion, and its impact has been prepared in order to confirm a safe long-term storage method of the vessel. The code system consists of several analytical codes such as general-purpose CFD code FLUENT, deflagration analytical code FLACS and detonation analytical code AUTODYN and interfaces connecting each code.

This report presents an outline of analytical code system including interfaces, and introduces preliminary analytical study on distributions of hydrogen concentration and temperature in a pressure vessel, and dynamic pressure distribution after hydrogen burning and explosion.

Keywords: Spent Zeolite Vessel, Long-term Storage, Hydrogen, Diffusion, Burning, Explosion, Analytical Code System, Preliminary Analytical Study

---

+1 Nuclear Hydrogen and Heat Application Research Center

目次

1. 緒言 ····· 1
2. 汚染水処理システムの概要 ····· 2
2.1 全体構成 ····· 2
2.2 吸着塔 ····· 4
2.3 使用済みセシウム吸着塔一時保管施設 ····· 4
3. 解析対象 ····· 5
4. 水素拡散/燃焼影響評価解析システムの概要 ····· 6
4.1 汎用熱流体解析コード（FLUENT）の概要 ····· 6
4.2 爆燃解析コード（FLACS）の概要 ····· 7
4.3 爆ごう解析コード（AUTODYN）の概要 ····· 7
4.4 コード間インターフェース ····· 8
5. 予備解析（吸着塔内水素拡散解析評価） ····· 14
5.1 水素拡散解析 ····· 14
5.2 FLUENT-FLACS 間インターフェースの機能確認 ····· 20
5.3 FLACS-AUTODYN 間インターフェースの機能確認 ····· 20
6. まとめ ····· 21
謝辞 ····· 21
参考文献 ····· 22

Contents

1. Introduction ····· 1
2. Outline of High Level Contaminated Water Processing System ····· 2
2.1 Entire System ····· 2
2.2 Adsorption Vessel ····· 4
2.3 Storage Facility for Spent Vessels (Box Culvert) ····· 4
3. Phenomena for Analysis ····· 5
4. Outline of Hydrogen Diffusion ,Fire and Explosion Analysis Code System ····· 6
4.1 Outline of General-purpose CFD Code FLUENT ····· 6
4.2 Outline of Deflagration Analysis Code FLACS ····· 7
4.3 Outline of Detonation Analysis Code AUTODYN ····· 7
4.4 Interface to Connect Between Each Code ····· 8
5. Preliminary Analysis of Hydrogen Diffusion in Adsorption Vessels ····· 14
5.1 Hydrogen Diffusion Analysis ····· 14
5.2 Data Conversion Test from FLUENT Results to FLACS Input Data ····· 20
5.3 Data Conversion Test from FLACS Results to AUTODYN Input Data ····· 20
6. Concluding Remarks ····· 21
Acknowledgements ····· 21
References ····· 22

表リスト

Table 5.1 過剰圧時刻歴出力点に対応する FLACS の要素番号 IC ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 24

図リスト

Fig.2.1 汚染水処理設備等の全体概要図（系統概要図） ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 25
Fig.2.2 セシウム吸着塔の系統構成図 ・・ 26
Fig.2.3 セシウム吸着塔の概略図 ・・・ 27
Fig.2.4 使用済みセシウム吸着塔一時保管施設概要図 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 27
Fig.2.5 コンクリート製ボックスカルバート ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 28
Fig.4.1 水素拡散／燃焼影響評価システムの構成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 29
Fig.4.2 FLUNET Node データからの FLACS Cell 中心データの抽出 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 30
Fig.4.3 FLUNET-FLACS 間インターフェースプログラム入力ファイル記述例 ・・・・・・ 30
Fig.4.4 過剰圧分布履歴データファイルのフォーマット ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 31
Fig.4.5 計算要素番号 IC と格子点番号（I,J,K）の関係 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 31
Fig.4.6 Shell パーツの面の定義 ・・・ 32
Fig.4.7 境界条件の設定 ・・ 32
Fig.4.8 FLACS_BC 境界条件のパーツへの設定 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 33
Fig.4.9 ユーザ変数の設定 ・・・ 33
Fig.4.10 過剰圧分布履歴データファイル名の入力 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 34
Fig.4.11 確認メッセージ ・・ 34
Fig.5.1 境界条件 ・・ 35
Fig.5.2 水素濃度分布計算例 ・・・ 36
Fig.5.3 温度分布計算例 ・・ 36
Fig.5.4 インターフェース確認用モデル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 37
Fig.5.5 FLUENT による解析結果 ・・ 38
Fig.5.6 FLACS による質量分率結果 ・・・ 38
Fig.5.7 爆風圧時刻歴 ・・ 38
Fig.5.8 燃料質量分率、圧力 0[sec] ・・ 39
Fig.5.9 最大温度、最大圧力 0[sec] ・・ 39
Fig.5.10 燃料質量分率、圧力 0.2[sec] ・・ 40
Fig.5.11 最大温度、最大圧力 0.2[sec] ・・ 40
Fig.5.12 燃料質量分率、圧力 0.4[sec] ・・ 41
Fig.5.13 最大温度、最大圧力 0.4[sec] ・・ 41
Fig.5.14 燃料質量分率、圧力 0.6[sec] ・・ 42
Fig.5.15 最大温度、最大圧力 0.6[sec] ・・ 42

Fig.5.16 燃料質量分率、圧力 0.8[sec] ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 43
Fig.5.17 最大温度、最大圧力 0.8[sec] ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 43
Fig.5.18 燃料質量分率、圧力 1.0[sec] ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 44
Fig.5.19 最大温度、最大圧力 1.0[sec] ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 44
Fig.5.20 燃料質量分率、圧力 2.0[sec] ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 45
Fig.5.21 最大温度、最大圧力 2.0[sec] ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 45
Fig.5.22 燃料質量分率、圧力 3.0[sec] ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 46
Fig.5.23 最大温度、最大圧力 3.0[sec] ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 46
Fig.5.24 テキストファイル「FLACS_data_check.txt」の内容 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 47
Fig.5.25 機能確認のための AUTODYN 解析モデル図 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 47
Fig.5.26 Shell 要素の面の方向（水は非表示） ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 48
Fig.5.27 FLACS_BC 境界条件の位置（図中メッシュ分割部上部領域） ・・・・・・・・・・・・・ 48
Fig.5.28(a) 時刻 50ms におけるパーツ表面に負荷された過剰圧コンター図 ・・・・・・・・・ 49
（ユーザ変数 VAR02）
Fig.5.28(b) 時刻 100ms におけるパーツ表面に負荷された過剰圧コンター図 ・・・・・・・ 49
（ユーザ変数 VAR02）
Fig.5.28(c) 時刻 150ms におけるパーツ表面に負荷された過剰圧コンター図 ・・・・・・・・ 50
（ユーザ変数 VAR02）
Fig.5.28(d) 時刻 200ms におけるパーツ表面に負荷された過剰圧コンター図 ・・・・・・・ 50
（ユーザ変数 VAR02）
Fig.5.28(e) 時刻 250ms におけるパーツ表面に負荷された過剰圧コンター図 ・・・・・・・・ 51
（ユーザ変数 VAR02）
Fig.5.28(f) 時刻 300ms におけるパーツ表面に負荷された過剰圧コンター図 ・・・・・・・・ 51
（ユーザ変数 VAR02）
Fig.5.29 Table5.1 に記載した FLACS 要素番号 IC における過剰圧時刻歴 ・・・・・・・・・・・ 52
Fig.5.30 AUTODYN 解析結果における各出力点での過剰圧時刻歴 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 52
Fig.5.31 計算開始直後の速度ベクトル図 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 53

1．緒　言

福島第一原子力発電所の事故では、事故当初において原子炉冷却のために海水が注入され、それらが原子炉内の冷却水と混合して放射能汚染水として原子炉内に大量に滞留している。この塩分を含んだ汚染滞留水を削減するため、滞留水中の放射能源であるセシウムをゼオライトで吸着除去する汚染水処理システムが導入され、汚染水処理が鋭意行われている[1),2)]。汚染水処理にはKURION社製等のセシウム吸着塔（内部にゼオライトを充填）が使用され、処理に使われた使用済みセシウム吸着塔の保管が既に始まっている。使用済みの吸着塔はセシウムを内蔵しているため、専用の一時保管施設に設置されたコンクリート製の容器（ボックスカルバート）内に使用済み吸着塔を多数集合して長期保管される。

長期保管時には、セシウム吸着塔（以後、吸着塔と呼ぶ。）内に残留する水及びセシウムに吸着されている水分が、セシウムによる放射線で水素と酸素に分解する。同時に、吸着されたセシウムの崩壊熱による温度上昇により水素の引火爆発が懸念され、吸着塔を安全に長期保管する際の重要課題の一つとしてあげられている[1)]。この課題に対して、高温ガス炉による原子力水素製造で培った水素に関する解析技術、取り扱い技術を基に、吸着塔内の温度/水素濃度分布等を3次元解析する水素拡散解析コードに水素燃焼・爆発及び容器等への影響を解析するコードを組み合わせた水素拡散/燃焼影響評価解析システムを整備した。

本報告では、整備した解析システムの概要と水素拡散解析、燃焼解析、影響評価解析の各コードの特徴、各コードを連成させるために開発したインターフェースの機能について概説する。併せて、水素拡散、燃焼、及び影響評価解析の各コードは、システムの早期活用に向けて豊富な事例を有する汎用コードを活用していることから、インターフェース機能を中心に機能確認のための予備解析として、ステンレス製円筒容器中での水素混合ガスの自然対流・拡散現象による水素濃度分布、温度分布解析、及び、容器内にて着火が起こった場合における水素燃焼解析による容器内圧力解析、さらに、水素濃度分布結果を元に容器内で爆轟が発生した場合の容器の応力解析結果例を紹介する。

２．汚染水処理システムの概要

高濃度の放射性物質を含んだ汚染水から放射性物質を除去するために、福島第一原子力発電所内に汚染水処理システムが設置され、事故が発生して約 3 ヶ月後の 2011 年 6 月 17 日から処理を開始している。このシステムは、上述したように汚染水中の放射性物質を除去し環境中に移行しにくい性状とすることに加え、原子炉冷却に処理水を再循環して用いる（循環注水冷却）ことにより、滞留水量を低減していくことを目的としている。本章では、汚染水処理システムの全体構成及び解析対象である吸着塔及び使用済み吸着塔を保管する使用済みセシウム吸着塔一時保管施設について説明する。

2.1　全体構成 [1)-3)]

汚染水処理システム構成の概要図を Fig.2.1 に示す。本システムは、循環注水冷却の中核であり、油分分離装置、放射性物質処理装置、淡水化装置から構成される。1 号から 4 号炉のタービン建屋等に滞留した汚染水は、集中廃棄物処理建屋に移送された後、汚染水処理システムにより油分の分離、放射性物質の除去及び塩分除去が行われる。

汚染水処理システムは、原子炉への注水、雨水の侵入、地下水の浸透等によりタービン建屋等に発生する汚染水を十分処理できるよう、処理容量 1,200m^3/日（50m^3/h）を 100%容量（稼働率約 70%を仮定）として設計されている。ただし、実際の処理では放射性物質処理装置（セシウム吸着装置）の並列運転により 1 日に 1,680m^3/日（70m^3/h）で処理した実績もある。実際の汚染水処理・貯蔵の状況については、東京電力（株）による定期的なプレス発表により確認することができる [2)]。

汚染水処理システムの動的機器は多重化されており、故障等により長期の処理停止とならないよう設計されている。また、処理システムの設置後、設備の不具合、廃液漏えい等が発生したため、設備の信頼性向上、漏えい防止対策として、機器の追加、監視の強化が行われている。

次に、汚染水処理システムの各装置の概略を説明する。

（1）油分分離装置

高濃度汚染水には津波等によりタービン油等が混入している。この油分は、セシウム吸着剤であるゼオライトの吸着性能を低下させるなどシステムの安定稼働の障害となることから、放射性物質処理装置の上流に設置された油分分離装置により除去する。油分分離装置はプロセス主建屋内に設置されており、高濃度汚染水の漏えいがあった場合にも所外への放射性物質の漏えいを防止している。

（2）放射性物質処理装置（セシウム吸着装置、第 2 セシウム吸着装置、除染装置）

放射性物質処理装置は、①セシウム吸着装置（KURION 社）、②第二セシウム吸着装置（東芝/Shaw 社）及び③除染装置（AREVA 社）で構成され、主としてセシウム（Cs-134 及び Cs-137）が除去される。放射性物質処理装置の除染性能は、セシウム吸着装置と除染装

置の組み合わせにおいて、Cs-134、Cs-137 等に関して除染係数（DF）10^6 を目標にし、第二セシウム吸着装置は単独運転において除染係数（DF）10^6 を目標にしている。放射性物質処理装置の稼働後、除染係数（DF）は概ね目標値を満足している。

① セシウム吸着装置の系統構成図を Fig.2.2 に示す。セシウム吸着装置は、3 種類の吸着剤を充填した吸着塔で構成されており、これらを直列に通すことでそれぞれの汚染物質を除去することができる。セシウムを吸着する H スキッドでは、Cs^+イオンの交換能力に優れたゼオライトであるハーシェライトが用いられている。
セシウム吸着装置は、4 系列とすることにより各系列のポンプや弁により処理流量の変更が可能となっている。吸着塔の構造等に関しては、2.2 で詳しく説明する。
なお、本報告の解析等ではこの KURION 吸着塔を対象とし、後述の第二セシウム吸着装置の SARRY は対象としない。以後、特に断りのない場合、吸着塔、使用済み吸着塔の記載は KURION 吸着塔に関する記述とする。

② 第二セシウム吸着装置（SARRY）[4)]は、前述のセシウム吸着装置と同じく吸着剤を用いてセシウムを吸着する装置であり、2011 年 8 月に追設された [5)]。
SARRY では吸着剤として、米 UOP 社の IE-96（ゼオライト）及び IE-911（チタンケイ酸塩）を用いている。これらは、海水条件で優れた吸着性能を示す [4),6),7)]。また、2 系列の吸着塔を有しており、吸着剤の有効利用により廃棄物量を減少させるため、1 塔目を交換したら 2 塔目を最初に通水するというように、通水順を塔の使用程度に従って変更可能なシステムを採用している。

③ 除染装置は、汚染水に薬剤を添加する沈殿法であり、薬品に吸着させた放射性物質を凝縮・沈殿させた後、上澄み液とスラッジに分離することで、放射性物質を除去する。

ここで記した放射性物質処理装置は、各装置を単独あるいは組み合わせて運転することが可能である。稼働当初は、セシウム吸着装置及び除染装置の組み合わせ並びに第二セシウム吸着装置の並列運転を行っていたが、除染装置は廃スラッジの取り扱いや機器腐食等の問題から 2011 年 9 月以降に運転を停止した。それ以降は、セシウム吸着装置と第二セシウム吸着装置の並列運転を行い、現在は、放射性廃棄物の発生量が低減していることなどから、第二セシウム吸着装置を主とした運転が行われ、セシウム吸着装置はそのサポート、除染装置はバックアップとして運用されている。

なお、これらの汚染水処理システムでは主としてセシウムを除去するが、処理水の放射性物質の濃度を十分に低下させるため、新たにセシウム以外の放射性核種の除去が可能な多核種除去装置（ALPS）の導入が進められている [8),9)]。

（3）淡水化装置

セシウムを除去した汚染水は、淡水化装置により塩分を除去する。淡水化装置は 2 段階で構成されており、まず RO 膜を用いて淡水と濃縮塩水に分離した後、濃縮塩水は蒸発濃縮（蒸留）により淡水と濃縮廃液に分けられる。得られた淡水は原子炉への注水に再利用さ

れる。

なお、これらの汚染水処理システムでの処理に伴い発生する二次廃棄物（濃縮塩水、廃スラッジ、使用済み吸着塔）は、貯蔵タンク及び廃棄物保管施設に一時保管される。2013 年 3 月 12 日現在、汚染水の累積処理量は約 591,320m^3 となっており、廃棄物発生量は、使用済み吸着塔が 480 本（KURION : 410 本、SARRY : 70 本）、廃スラッジが 597m^3 である [2)]。

2.2　吸着塔 [1),6),10)]

セシウム吸着装置に用いられる KURION 社製の吸着塔は、Fig.2.3 に示すように、重量約 15 トン、外形約 1.4m、高さ約 2.4m の円筒形容器であり、耐腐食性、対応力腐食割れ性を有するステンレス（SUS316L）製容器内部にゼオライトが充填されている。ステンレス製容器は炭素鋼製の遮へい容器に覆われた二重構造となっており、さらに吸着装置スキッド内に設置される。

吸着塔内のゼオライトには放射性セシウムが吸着し濃縮されるため、吸着塔内の水の放射線分解による水素発生、崩壊熱等に対し、以下のような安全面での対策が行われている。

吸着塔内の水の放射線分解による水素発生については、次のように対策されている。

- 発生した水素は、通水時であれば処理水とともに排出される。
- 通水が停止した場合には、水素滞留の防止のため、吸着塔に設けられたベント弁を開いて通気する。
- また、使用済みの吸着塔については、水素発生の抑制のため、使用済み吸着塔仮保管施設において、ろ過水による内部の洗浄及び水抜き操作を行っている。
- さらに、ベントを開いた状態で貯蔵することにより、発生した水素を大気に放出し、水素の滞留を防止している。

崩壊熱除去に関しては次のように考慮されている。

- ゼオライトに吸着した放射性物質の崩壊熱は、通水時は処理水により熱除去される。
- 通水停止後、吸着塔内部の水抜きが行えない場合においても、水の温度上昇は約 1℃/h であり、状態を確認しながらの復旧で問題ないとされている。

吸着塔の交換は、放射線業務従事者の線量低減を考慮し、スキッド表面の線量当量率が 4mSv/h 程度になると実施される。これにより、2 系列運転において 1 系列あたり 2、3 日に 1 体であったが、滞留水中の放射性物質の濃度低下や塩素濃度の低下により交換頻度は次第に低くなっている。交換した吸着塔の保管については、2.3 で述べる。

2.3　使用済みセシウム吸着塔一時保管施設 [1),10)]

使用済みの吸着塔は、処理施設等が設置されるまでの間、使用済みセシウム吸着塔仮保管施設での一時貯蔵を経て、Fig.2.4 に示す使用済みセシウム吸着塔一時保管施設に貯蔵される。このとき、吸着塔自身を放射性廃棄物保管のための鉄製容器として活用し、さらに Fig.2.5 に示すように遮へい機能を有するコンクリート製のボックスカルバートに収納する。このボックスカルバートは鉄筋コンクリート床板上に設置され、スカイシャイン対策とし

て、コンクリート製の蓋をかぶせる。ボックスカルバートの側面及び蓋の厚さは約200mm[8),11)]である。保管場所では、線量低減のためさらに土嚢を配置している。

貯蔵に当たっては、耐震 B クラスの施設で要求される水平震度に対して使用済み吸着塔が転倒しないように設計されている。また、貯蔵される使用済み吸着塔は水抜きされており、放射性物質を含んだ液体の漏えいの可能性は基本的にない。蓋には通気口が設けられ、内部で水素が滞留しないようになっている。

３．解析対象

使用済み吸着塔の長期保管においては、放射線分解により発生した水素が滞留し、濃度が上昇すると燃焼・爆発の危険がある。これに対して、福島第一原子力発電所サイト内に一時保管されている吸着塔容器、保管設備（ボックスカルバート）は水素濃度低減のため、前述の通り、対策が図られている。ただし、使用済み吸着塔内部のゼオライトは高線量廃棄物であることから、周辺公衆に対する放射線被曝のリスク低減のため、万が一に備え水素燃焼・爆発による容器構造の機械的影響を含め、水素ガスの滞留防止対策の妥当性評価は重要である。

使用済み吸着塔内部においては、ゼオライトに吸着した水分や、吸着塔内に残留した水の放射線分解により水素が発生する。万が一、内部に水素が滞留した状態で、ゼオライト層に吸着した放射性物質の崩壊熱等により自己着火温度を上回るような温度上昇や帯電した金属浮遊物の静電気等が着火源となって燃焼・爆発が発生した場合には、爆発によって生じる圧力波（爆ごうの場合、衝撃波）による衝撃圧が容器内壁に負荷される。

そこで、使用済み吸着塔内部において、ゼオライトに吸着した水分や、吸着塔内に残留した水の放射線分解により発生した水素の塔内の滞留状況、発生した水素が吸着塔のベント管、水出口配管等を通して塔外に排出された場合の保管設備内での滞留状況、及び、高濃度に滞留した場合の水素燃焼事故を解析対象として、第 4 章において説明する水素拡散/燃焼影響評価コードシステムを整備し、第 5 章においてその機能確認のための予備解析を行った。

４．水素拡散/燃焼影響評価解析システムの概要

福島原発の汚染水処理用吸着塔容器及び容器保管建屋の健全性評価の一環として、吸着塔容器内での水素燃焼・爆発による吸着塔容器、さらには容器保管建屋等への影響を評価するための水素拡散/燃焼影響評価解析システムの開発・整備を行った。コードシステムの概要を Fig.4.1 に示す。

このコードシステムの整備に当たっては、汎用の商用 CFD（Computational Fluid Dynamics）コードを組み合わせることとし、汎用熱流体解析コード FLUENT、爆燃解析コード FLACS 及び爆ごう解析コード AUTODYN を相互に連成できるようにインターフェースを開発した。なお、本コードシステムに採用したこれらのコードは、使用実績や正確性の検証事例が豊富であること、要求される解析機能を有している。

本章では、解析コードシステムの中核をなす FLUENT、FLACS、AUTODYN の各コードの概要及び各コード間でデータの受け渡しを行うためのインターフェースについて述べる。

4.1　汎用熱流体解析コード（FLUENT）の概要 [12)]

FLUENT は、FLUENT 社が開発した汎用の熱流体解析コードであり、流動、伝熱、物質移動及び化学反応を含む現象を解析可能である。（なお、FLUENT 社は 2006 年米国 ANSYS 社によって合併された。）複雑形状における広範囲の流れのシミュレーションに対応していることが特徴であり、世界的に最もよく利用されている CFD コードの 1 つである。

FLUENT は、分離型、連成型陰解法、連成型陽解法の 3 種類のソルバーを用いて質量、運動量、エネルギー、化学種に関する各保存方程式を解く。これらにより、流体の種類、物理モデル等に合わせて適切な解法を選択することで解の収束を早くすることができる。なお、物理モデルによっては使用できるソルバーの種類が限定されているが、定常解析及び非定常解析が可能であり、並列処理計算もサポートされている。

モデル化に関しては、非構造格子を使用したメッシュ生成時間の短縮、複雑形状のモデル化等を可能としている。また、モデル形状にフィットした構造格子も使用できるという特徴を有する。メッシュタイプとして、2D 三角形/四辺形, 3D 四面体/六面体/ピラミッド/くさび形, および混合(ハイブリッド) メッシュがサポートされている。

取り扱い可能な流体として、非圧縮性流体、圧縮性流体、ニュートン流体、非ニュートン流体があり、あらゆる速度（低亜音速流、覇音速流、超音速流及び極超音速流）に対応している。非粘性流、層流、乱流に関する物理モデルが豊富に用意されており、化学反応、燃焼、混相流、相変化等を扱うことができる。特に、ロバストで高精度な乱流モデルは FLUENT の大きな特徴であり、様々な工学問題に対応でき、それらの問題に付随あるいは中核となる浮力や圧縮性等の物理現象を考慮することができる。また、ロバストな乱流モデルに必須の壁近傍の精度に関しては、改良型壁関数やゾーンモデルを採用して高精度化を図っている。

なお、FLUENT は単独での実行に加え、ANSYS Workbench[13)]の統合環境からも利用できるため、ANSYS 社の設計・開発工程を支援するコンピュータシステム（Computer Aided

Engineering、CAE）ソフト群との連携が容易である。

4.2　爆燃解析コード（FLACS）の概要 [14)-16)]

FLame ACceleration Simulator (FLACS) はノルウェーの Global Explosion Consultants (GexCon) 社が開発した、水素や可燃性ガスの開放あるいは閉空間における燃焼爆発危険性解析のためのコードである。国内では、(株) 爆発研究所が正規販売代理店となっている [17)]。特に、爆発等の安全に関わる現象の再現・予測することに適しており、爆発現象の解明・予測、爆発伝播解析及び気体・エアゾール等の拡散解析、粉じん爆発解析等の各種ツールを備えている。

CAD データ等を用いて複雑な構造体をモデル化しメッシュを作成する場合、一般的な流体シミュレーションでは、流体速度や構造物の再現性のため詳細メッシュによる解析が必要となるが、FLACS では、Partly Block を用いることで、荒いメッシュでの解析が可能,すなわち、計算負荷の大幅低減が可能という特徴を有する。

FLACS の検証は、様々な条件行われた実験結果を用いて続けられており、その解析精度は高く評価されている。例えば、HYSAFE[18)]で行われた水素放出分布の評価プロジェクトにおいても高評価を得ている。

4.3　爆ごう解析コード（AUTODYN）の概要 [19),20)]

AUTODYN は、米国の Century Dynamics 社と（株）CRC ソリューションズが共同で開発した衝撃解析コードで、高速度領域における衝撃解析、火薬・可燃性ガスによる爆ごう解析等を行うことができる。なお、Century Dynamics 社は 2005 年米国 ANSYS 社によって合併され、（株）CRC ソリューションズは 2006 年伊藤忠テクノサイエンス（株）と合併し伊藤忠テクノソリューションズ（株）となっている。1985 年の開発開始当初からコンピュータグラフィックスと対話型機能を取り入れ、プリ・ポスト処理プログラムと解析プログラムが完全一体化した総合システムであることが大きな特徴である。

AUTODYN では、Lagrange、Euler (1 次精度マルチ・マテリアル法（Multi-Material Euler）（2 次元のみ）、2 次精度マルチ・マテリアル法（Multi-Material Euler）（3 次元のみ）、FCT(Flux Corrected Transport)法（2 次元、3 次元）)、ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian)、Shell、Beam、SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)の各種ソルバーが標準で用意されている。さらに、これらの各種ソルバー間のラグランジュ/ラグランジュ相互作用及びラグランジュ/オイラー相互作用を取り扱うことができ、様々な連成問題の解析に対応することができる。相互作用の設定はほぼ自動化されており、容易に連成させることができる。また、エロージョン機能を有しており、メッシュが潰れるような大変形問題であっても自動的に処理を行い、計算を続行することができるという特徴を有する。

材料特性は、状態方程式、構成則、破壊則で定義される多くの材料モデルが標準でサポートされている。状態方程式は熱力学的平衡状態における静水圧と内部エネルギー、密度の関係、構成則はせん断応力とひずみの関係および/または降伏基準、破壊則は物質の破壊基準を定義するものである。また、一般的な等方性材料、直交異方性材料、コンクリート

等の 250 種類以上の材料データベースが標準で利用可能であり、この中には爆薬も含まれる。材料データベースの一部を修正して利用することや、ユーザが独自に材料モデルを定義し、材料データベースに登録することも可能である。

AUTODYN では、標準で多くの材料モデル、条件設定等を解析に用いることができる一方、より複雑なあるいは特殊な問題に対しては、ユーザ自身がユーザサブルーチンを独自に定義して組み込むことで対応することができる。この時、公開されているプログラム内変数を用いて、自由度の高いサブルーチンを作成することができるため、様々な問題に対応することができる。

4.4 コード間インターフェース

本節では、FLUENT、FLACS、AUTODYN 間のデータ受け渡しを行うためのコード間インターフェースについて述べる。このインターフェースは、吸着塔容器内で発生する水素ガスの拡散挙動解析結果を、吸着塔容器内での水素爆発に伴う圧力波伝播挙動を解析する衝撃コードの入力データとして変換させるためのものである。具体的には、FLUENT の解析結果を FLACS の入力ファイルに変換するためのインターフェース､FLACS の解析結果を AUTODYN の入力ファイルに変換するインターフェースである。各インターフェースの概要を以下に述べる。

4.4.1 FLUENT-FLACS 間のインターフェース

（1）概要

FLUENT-FLACS 間のインターフェースは、FLUENT 解析結果から得られるデータを FLACS（Ver.9.1）の入力データに変換し、FLACS の着火、爆風圧解析を行うものである。FLUENT のデータは、解析結果から得られた最終時刻のデータとし、このデータを初期条件とする爆発解析を FLACS にて行う。

解析手順は、まず FLUENT によって解析された流体現象解析の結果（温度、圧力、FUEL 量）を FLACS のインプットデータとして取得する。次に、この初期条件から FLACS にて着火し、この際の爆風圧、温度等を解析する。水素ガスの流体解析を FLUENT で行った結果を爆風圧解析ソフト FLACS の Input data とするためには、FLACS の機能にある CLOUD ファイルフォーマットの作成、もしくは a3file コマンド併用を行う必要がある。ここで、CLOUD ファイルフォーマットは、ガス種の FUEL 量（Fuel mass fraction）のみ取り扱うことが可能である。一方、a3file は、温度、圧力、FUEL 量、速度（UVW）、乱流運動エネルギー、散逸率を入力値として与えられるが、FLACS Version10 からの対応となっている。

（2）プログラム

FLUENT から得られるデータフォーマットは、非直行不等間隔データかつ Node データであるのに対し、FLACS は、直行不等間隔座標、Cell データを取り扱う。従って、a3file の作成は、これらの変換を可能とするプログラムが必要になる。

非直行不等間隔・Node データから、直行不等間隔座標・Cell データへの変換は、FLACS

側で必要となるデータポイントから、最も近い 8 点のデータを FLUENT 結果から抽出し、それぞれの変数に対して、8 点の中の最大値を利用する（Fig.4.2）。

8 点のデータから抽出した各変数のデータ値は、値が鈍化する恐れがあるため、重み補間等の操作を行わない。ただし、インターフェース作成プログラムには作成しており、コメントアウトを外し、コンパイルし直すことで実装は可能である。プログラムのコンパイルは、C 言語のコンパイラである gcc で実行できることを確認している。なお、作成した上記プログラムの実行には、インプットファイルが必要である。Fig.4.3 にインプットファイル（input.dat）の記述例を示す。

また、作成した上記プログラムの実行には FLACS の形状及び Porosity データを必要とするため、FLACS 上で形状モデリング及び Grid 作成、Porosity 作成（Porocal 実行）後、適当なシナリオ設定を行い、実行する必要がある（例えば、ガス配置を適当に行い、着火時間を数秒後にして、それまでに計算が終了する様、TMAX を設定する）。ただし、この際、SINGLE_FIELD_3D_OUPUT については以下の変数について出力設定を行う必要がある。

NFUEL ：Fuel mass fraction
NK ：Turbulent kinetic energy
NEPS ：Dissipation rate of turbulent kinetic energy
NP ：Pressure
NPMAX：Maximum pressure
NRHO ：Density
NT ：Temperature
NU ：Velocity component x-direction
NV ：Velocity component y-direction
NW ：Velocity component z-direction

この簡易実行で r3 ファイル（結果ファイル）が作成されるので、以下のコマンドで、a3******.PORV ファイルを作成する（*は 6 桁の数値）。

```
$> run9 r3file r3******.dat3 grid=1 force
```

input.dat（Fig.4.3）及び、a3******.PORV、そして FLUENT から得られた解析結果を同じディレクトリ内に配置し、インターフェースプログラムを実行することで、input.dat に記載した出力ファイル名.CLOUD ファイルが出力される。

（3）利用方法

a3file の作成方法は、上記で作成したインターフェースプログラム実行後、作成された以下のファイルを a3file コマンド及び ccfile を作成して FLACS の入力データとする。ccfile については、FLACS マニュアル [4)]を参考のこと。

CLOUD ファイルも同様に、上記で作成したインターフェースプログラム実行により作成された*.CLOUD ファイルを、解析する同ディレクトリに移動し、ファイル名を cs ファイルの拡張子を除いたファイル名に変更する（cs ファイルが cs000001.dat3 であれば、cs000001.CLOUD）。

この他、CLOUD ファイルを実行するために、シナリオファイル(cs000001.dat3)にある、GAS_COMPOSITION_AND_VOLUME の項目で、POSITION_OF_FUEL_REFION、DIMENSION_OF_FUEL_REGION を全て 0.0 に設定する。

上記操作で、FLACS を通常通り実行することにより、FLACS 解析を行うことができる[4)]。

（4）2.FLACS 解析結果を AUTODYN に引き渡すデータの作成

FLACS 解析結果から AUTODYN に引き渡すデータは、爆風圧データ（圧力）のみとなる。本プログラムのコンパイルも、gcc で実行できることを確認している。

このプログラムを実行するためには、FLACS の r3file と呼ばれるプログラムを利用して ASCII データに変換する必要がある。r3file コマンドは、4.4.1（2）で示したコマンドでも可能であるが、ここでは圧力データのみが必要なので、以下のコマンドで対応できる。コマンドの詳細は FLACS マニュアル[4)]を参照のこと

```
$> run9 r3file r3******.dat3 name=NP grid=1
```

上記コマンドによって得られる、a3******.NP と a3*****.PROV ファイルを同一ディレクトリに配置し、プログラムを実行することで、sample00.dat が出力される。

なお、FLACS r3file で出力されるデータは Cell データ+計算境界面データになっており、プログラムでは、境界面データを出力せず、Cell データのみ出力するようになっている。

4.4.2　FLACS-AUTODYN 間のインターフェース

（1）概要

FLACS-AUTODYN 間のインターフェースは、FLACS 解析結果から得られる爆風圧データを AUTODYN（Ver.14）の入力データに変換し、AUTODYN で構造解析を行うものである。FLACS の解析結果データは爆風圧の時刻歴データとし、AUTODYN の解析で構造体に破断すると解析を終了する一方向連成解析とする。

解析手順としては、まず FLACS によって構造物を剛とした水素ガスの爆燃現象を解析し、解析空間全域における時系列的な過剰圧分布履歴データを取得する。次に、この過剰圧分布履歴データはファイルとして出力する。次に AUTODYN に組み込んだインターフェースを用いて、過剰圧分布履歴データファイルを読込み、爆発威力を受ける構造物表面に対して時間の経過とともに負荷しながら、構造物の変形挙動を解析する。

（2）プログラム

ここでは、FLACS の爆燃解析によって得られた過剰圧分布履歴データを AUTODYN へ受

け渡すためのデータファイルのフォーマットについて解説する。ファイルのフォーマットを、Fig.4.4 に示す。

FLACS での計算格子（メッシュ）データおよび全計算要素および全時刻での過剰圧（ゲージ圧）データは、すべて 1 つのファイルに書き込むものとする。なお、ファイルサイズは CD 1 枚程度（700MB）とし、最大でも DVD 1 枚程度（4.7GB）に収まるように設定することを推奨する。ファイルはテキスト形式、数値間はスペース区切り、精度は FLACS で保証できる範囲とする。また、距離の単位は mm、時刻の単位は ms、過剰圧の単位は kPa とする。

過剰圧は計算要素の中心の値(または、計算要素内の平均値)とする。計算要素番号 IC と格子点番号(I,J,K)の関係を Fig.4.5 に示す。計算要素を構成する格子点（I～I+1、J～J+1、K～K+1）のうち最も小さい格子点番号（I,J,K)、および、それぞれの方向の最大要素数 NX、NY、NZ を用いると、要素番号 IC は以下のようになる。

$$IC = (I-1)*NY*NZ + (J-1)*NZ + (K-1) + 1$$

例えば、FLACS の計算格子が NX=10、NY=20、NZ=30 の場合、要素番号 IC を構成する格子点が I=1～2、J=10～11、K=20～21 とすると、I=1、J=10、K=20 となり、

$$IC = (1-1)*20*30 + (10-1)*30 + (20-1) + 1 = 290$$

となる。

なお、FLACS において気体を満たさない評価対象外の計算要素では、AUTODYN 側で区別するために、過剰圧を-1000kPa として出力するものとした。

本過剰圧分布履歴データファイルのファイル名は任意とする。ただし、FLACS 側で指定されている場合はそれに従う。ファイルの保存フォルダは、AUTODYN の作業フォルダ（AUTODYN の 0 サイクルのデータを保存したフォルダ）とする。

（3）利用方法

ここでは、AUTODYN に組み込んだインターフェースを用いて、FLACS から出力された過剰圧分布履歴データファイルを読み込んで、構造物の時系列的な変形挙動を解析する手順を示す。

構造物の解析モデルは AUTODYN 上ですでに完成しているものとする。AUTODYN の基本的な使用方法についてはユーザマニュアル [10] 等を参照のこと。本インターフェースに適用する上で AUTODYN の解析モデルを作成する際の注意点を以下にまとめる。

- ✓パーツ形状・位置を FLACS での構造物の形状・位置と同一にする。
- ✓メッシュサイズを FLACS のメッシュサイズと同等にする。
- ✓Shell パーツを用いる場合、圧力を受ける面を裏側にして作成する。Fig.4.6 に Shell パーツの面の定義を示す。なお、Shell パーツの面の方向については AUTODYN の

画面で確認できる。ナビゲーションバーの[Plots]を選択、対象となる Shell パーツを選択して、[Shell normals]にチェックを入れる。すると、各 Shell 要素に裏面から表面方向の矢印（Shell 要素が正の過剰圧を受けて変形する方向と考えてよい）が表示される（Fig.5.26 参照）。

以下にインターフェースの使用手順を記す。

① インターフェースを組み込んだ AUTODYN（adv14dp_FLACS_interface.exe）を起動する。

② 事前に作成した構造物モデルを含む AUTODYN データファイルを読み込む（ここでは「flacs_interface_check_0.ad」）。なお、計算開始時の AUTODYN データは必ず 0 サイクルとする。

③ FLACS の過剰圧分布履歴データをパーツ表面に負荷するための境界条件を作成する。ナビゲーションバーの[Boundary]を選択し、以下を入力・選択する（Fig.4.7）。

[Name] :「FLACS_BC」(必ずこの名称とする)

[Type] :「Stress」

[Sub option] :「Stress (User-EXSTR3)」

④ 前項で作成した FLACS_BC 境界条件を対象となるパーツ表面に設定する。ナビゲーションバーの[Parts]を選択、パーツ選択画面から対象となるパーツを選択、[Boundary]ボタンを押す。Shell パーツの場合は[Block]、Lagrange パーツの場合は[I Plane]、[J Plane]、[K Plane]から適切なものを選択して以下を設定する（Fig.4.8）。

[From I/J/K][To I/J/K] :それぞれのパーツに対して適切に設定

[Boundary] :「FLACS_BC」

⑤ 前項で作成した FLACS_BC 境界条件の位置を確認する。ナビゲーションバーの[Plots]を選択、[Boundary]の右端の[>]を押して、「FLACS_BC」を選択する。次に対象となるパーツを選択して、[Boundary]にチェックを入れる。すると、FLACS_BC 境界条件を設定した位置が橙色に表示される(Fig.5.27 参照)。

[VAR01]を選択

[Activate]にチェック

[User variable name]:「PRES_FLACS」

[Restart]にチェック

⑥ ユーザ変数を設定する。ナビゲーションバーの[User var.]を選択、[Add]ボタンを押して、以下を設定する（Fig.4.9）。

[VAR01]を選択

[Activate]にチェック

[User variable name]:「PRES_FLACS」

[Restart]にチェック

なお、このユーザ変数は各 FLACS_BC 境界条件の位置に対応する FLACS の要素での過剰圧の値である。

⑦ メニューバーの[Setup]-[Description]を選択し、[Description]に FLACS の過剰圧分布履歴データファイル名(ここでは「sample00.dat」)を入力する（Fig.4.10）。

⑧ FLACS の過剰圧分布履歴データファイルを読み込む。ナビゲーションバーの[Output]を選択し、[Call EXEDIT]右の[+]を開き、[Run EXEDIT now]ボタンを押す。Fig.4.11(a)に示す確認メッセージ（その１）が表示されたら、[はい]を押す。すると、FLACS の過剰圧分布履歴データファイルの読み込みが完了し、Fig.4.11(b)に示す確認メッセージ（その２）が表示される。その際に読み込んだデータの要約を出力したテキストファイル「FLACS_data_check.txt」が作業フォルダに保存される(本テキストファイルの内容は Fig.5.24 を参照)。

⑨ 計算を実行する。計算中は④で設定した各パーツ表面の初期位置に対応する FLACS の要素番号 IC が検索され、その要素での過剰圧が時間の経過とともに負荷される。各パーツ表面に負荷される過剰圧はユーザ変数 VAR01 に保存される。

途中結果から計算を再実行する場合は、以下の手順で実施する。

・手順番号①を実施
・途中結果の AUTODYN データを読み込む
・手順番号⑧を実施
・計算を実行

５．予備解析（吸着塔内水素拡散解析評価）

本章では、構築した水素拡散/燃焼影響評価解析システムを用いて予備解析を行った。予備解析は KURION 社製の使用済み吸着塔（KURION 吸着塔）を対象に、容器内での水素拡散解析に続き、ステンレス製平底円筒容器内で滞留した可燃性ガス（水素）分布を基にしたコード間インターフェースの機能確認を実施した。

5.1　水素拡散解析

福島第一原子力発電所汚染水処理システムで使用された KURION 吸着塔は、一時保管施設ではコンクリート構造物のボックスカルバート内に保管される。吸着塔には、汚染水の出入りする配管 2 本と塔内圧力調整用のベント管 1 本があり、配管類のバルブは開放されて一時保管される。塔内部は、ゼオライトに吸着されたセシウム等の放射性物質の崩壊熱によって温度分布が生じるとともに、塔内にてゼオライトに吸着した水分が放射線分解して発生する水素、酸素量は、少量ずつではあるが塔内に拡散していく。このとき、塔内温度と水素濃度が上昇していくことが懸念されることから、上記の保管状況下で塔内の水素拡散に係わる熱流動解析を、3 次元モデルを用いて行った。解析には ANSYS　FLUENT Ver12.0 を用い、大気への放熱が定常となる際の吸着塔温度、及び塔内水素濃度を解析した。

5.1.1　解析モデル

（1）モデル形状

解析モデルは、Fig.2.3 に示す KURION 吸着塔をシールド容器、蓋を含め、３次元モデルで再現した。吸着塔容器に接続する配管類は、水出入口配管については、シールド容器に沿って地上から約 1.5m までを、ベント配管については T 分岐部から 1m までを解析領域とした。

（2）物性値

混合気体（水素、酸素、アルゴン、空気）物性値

・混合気体の密度 ρ ：非理想気体モデル(volume-weighted-mixing-law)

$$\rho = \frac{p_{op} + p}{RT \sum_i \frac{Y_i}{M_{w,i}}}$$

P ： 相対圧力

R ： 気体定数

Y_i ： 化学種 i の質量分率

$M_{w,i}$ ： 化学種 i の分子量
P_{op} ： 基準圧力（101.325Pa）

・混合気体の比熱 C_p：成分気体の混合則(mixing-law)

$$Cp = \sum_i Yi Cp,i$$

$C_{p,i}$： 化学種 i の定圧比熱
Y_i ： 化学種 i の質量分率

・混合気体の熱伝導率 k：成分気体の混合則(mass-weighted-mixing-law)

$$k = \sum_i Yiki$$

k_i： 化学種 i の熱伝導率
Y_i ： 化学種 i の質量分率

・混合気体の粘度 μ ：成分気体の混合則(mass-weighted-mixing-law)

$$\mu = \sum_i Yi\mu i$$

μ_i： 化学種 i の粘度
Y_i ： 化学種 i の質量分率

・混合気体の拡散係数（空気中の水素ガス、酸素、アルゴン拡散係数）：成分気体の混合則による拡散係数（multi-component）

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N} \frac{X_i X_j}{D_{ij}} \left(\vec{V}_j - \vec{V}_i\right) = \nabla X_i$$

D_{ij}： 2 成分物質拡散係数
X： モル分率
$\vec{V}$： 拡散速度

各化学種成分の相互拡散係数は、以下の多項式近似（温度関数）を文献値 [21)]から算出した。

・空気(air)－水素（H_2）

$$Dair\text{-}h_2=-4.08794\times10^{-6}+(7.93989\times10^{-8})T+(7.04391\times10^{-10})T^2+(-1.76119\times10^{-13})T^3+(4.38448\times10^{-17})T^4[m^2/s]$$

・空気(air)-酸素（O_2）

$$Dair\text{-}o_2=-2.23214\times10^{-6}+(2.71463\times10^{-8})T+(1.81706\times10^{-10})T^2+(-6.25863\times10^{-14})T^3+(1.59942\times10^{-17})T^4[m^2/s]$$

・空気(air）-アルゴン（Ar)

$$Dair\text{-}ar=-9.98184\times10^{-7}+(1.97497\times10^{-8})T+(1.76823\times10^{-10})T^2+(-4.48737\times10^{-14})T^3+(1.12809\times10^{-17})T^4[m^2/s]$$

・水素（H_2)-酸素（O_2)

$$Dh_2\text{-}o_2=-4.47854\times10^{-6}+(8.81986\times10^{-8})T+(7.12319\times10^{-10})T^2+(-1.88198\times10^{-13})T^3+(4.71459\times10^{-17})T^4[m^2/s]$$

・水素（H_2)-アルゴン（Ar)

$$Dh_2\text{-}ar=-6.63645\times10^{-6}+(7.64696\times10^{-8})T+(8.04792\times10^{-10})T^2+(-2.39315\times10^{-13})T^3+(6.36255\times10^{-17})T^4[m^2/s]$$

・酸素（O_2)-アルゴン（Ar)

$$Do_2\text{-}ar=-1.02662\times10^{-6}+(2.05611\times10^{-8})T+(1.72277\times10^{-10})T^2+(-4.55729\times10^{-14})T^3+(1.15216\times10^{-17})T^4[m^2/s]$$

水素物性値

密度（ρ_{h2}）：以下の多項式近似（温度関数）を文献値[21)]から算出

$$0.333586+(-0.00176539)T+(4.54793\times10^{-6})T^2+(-5.70629\times10^{-9})T^3+(2.79238\times10^{-12})T^4\ [kg/m^3]$$

粘性係数（μ_{h2}）：8.96×10^{-6}[kg/m-s]

定圧比熱（$c_{p\ h2}$）：1007[J/kg-K]

熱伝導率（λ_{h2}）：0.181[W/m-K]

酸素物性値

密度（ρ_{o2}）：以下の多項式近似（温度関数）を文献値[21)]から算出

$$5.91534+(-0.0362634)T+(0.000115184)T^2+(-2.0015\times10^{-7})T^3+(1.80604\times10^{-10})T^4+(-6.61958\times10^{-14})T^5\ [kg/m^3]$$

粘性定数（μ_{o2}）：2.072×10^{-5}[kg/m-s]

定圧比熱（$c_{p\ o2}$）：521.5[J/kg-K]

熱伝導率（λ_{o2}）：0.02629[W/m-K]

アルゴン物性値

密度（ρ_{ar}）：以下の多項式近似（温度関数）を文献値[21]から算出

$13.277+(-0.13676)T+(0.00071489)T^2+(-2.0883\times10^{-6})T^3+(3.4513\times10^{-9})T^4+(-3.0138\times10^{-12})T^5+(1.0797\times10^{-15})T^6$ [kg/m^3]

粘性定数（μ_{ar}）：2.271×10^{-5}[kg/m-s]

定圧比熱（$c_{p\ ar}$）：521.5[J/kg-K]

熱伝導率（λ_{ar}）：0.1767[W/m-K]

空気物性値

密度（ρ_{air}）：以下の多項式近似（温度関数）を文献値[21]から算出

$5.93254+(-0.0417627)T+(0.000159807)T^2+(-3.59432\times10^{-7})T^3+(4.75603\times10^{-10})T^4+(-3.43098\times10^{-13})T^5+(1.04181\times10^{-16})T^6$ [kg/m^3]

粘性定数（μ_{air}）：1.862×10^{-5}[kg/m-s]

定圧比熱（$c_{p\ air}$）：1007[J/kg-K]

熱伝導率（λ_{air}）：0.02614[W/m-K]

固体物性値

ゼオライト充填層物性値

密度（ρ_{zo}）：590[kg/m^3]

定圧比熱（$c_{p\ zo}$）：1000[J/kg-K]

熱伝導率（λ_{zo}）：0.159 [W/m-K]

粘性抵抗（Viscous Resistance）：2.2×10^4[kg/m^{3}s]

(Blake-Kozeny 式 $|\Delta p|/L=150\mu/Dp^2\times(1-\varepsilon)^2/\varepsilon^3\times v$、空隙率（ε）: 0.5、粒子径（Dp）: 0.5mm)[22]

シールド容器、吸着塔容器物性値

熱伝導率（λ_{st}）：16[W/m-K]

水出入口配管、ベント管物性値

熱伝導率（λ_{st}）：16[W/m-K]

空気層物性値

熱伝導率（λ_{air}）：0.0276[W/m-K]

（3）境界条件

境界条件を Fig.5.1 に示す。以下に特記事項を記す。

① ベント管端部の小口径配管への取り合いを多孔体（長さ 75[mm]、空隙率：0.25）としてモデル化して設置。

② 水入口管の吸着塔内部側端部開口部は、全孔面積と等価な開口面積（周状に隙間約 2[mm]）の溝を設け、圧力損失の計測値[23)]を参考に、その 2 倍に相当する流体抵抗板を設定した。

③ 水出口管の吸着塔内部側端部開口部は、突起状の複雑な開口部が上下方向に 21 箇所設置されている。本検討では、突起部の位置に厚さ 2.7[mm]の多孔板（空隙率：0.5）を設定した。粘性抵抗係数はゼオライト充填層と同様に Blake-Kozeny 式で計算した。

④ シールド容器と吸着塔容器の間の空気層は熱伝導と輻射（放射率：0.15）を考慮した熱計算を対象とした。その際、自然対流伝熱は考慮していない。

⑤ ゼオライト充填層は、多孔体でモデル化し、一定量の体積発熱量を混合ガスと固体ゼオライトの混合体に以下のように分配して与えた。粘性抵抗係数は Blake-Kozeny 式で計算した。

$$Q_{total} = Q_f + Q_s \text{ [W]}$$

$$Q_f = Q_{total} \times \frac{C_{pf}\rho_f V\varepsilon}{C_{pf}\rho_f V\varepsilon + C_{ps}\rho_s V(1-\varepsilon)} \text{ [W]}$$

Q_{total}：総発熱量（入力するエネルギーソース）

Q_f ：流体（混合ガス）に与えられる熱量

Q_s ：固体（ゼオライト）に与えられる熱量

⑥ ベント管、水出入口管端部は、大気開放とした。また、基準密度は、配管出口周囲環境条件から常温（27[℃]）の空気密度（1.176[kg/m^3])とした。

⑦ ベント管、水出入口管の配管肉厚は 3 次元シェル要素でモデル化し、熱伝導を考慮した。

⑧ シールド蓋とシールド容器の隙間は、1[mm]程度の空気層（熱抵抗）を考慮した。

⑨ 吸着塔容器とシールド容器の底部は完全熱伝導条件である。

⑩ シールド容器温度条件は、胴部を熱伝達率 2.5[W/m^{2}K]　雰囲気温度 27[℃]の弱い自然対流を仮定し、底部は断熱条件とした。

⑪ 塔内は乾燥状態（ゼオライト層は水のブリッジ等がない理想状態）を仮定している。

⑫ 水素発生量、発熱量は、其々18.3L/day、237W[24)]が一様にゼオライト層で発生していることを仮定している。

（4）初期条件

容器、配管内の初期状態は、大気圧、常温（27℃）とし、流れ場の速度は無いとした。

（5）メッシュ分割

解析に使用したメッシュ形状は、四面体要素。

計算時間と計算精度の観点から、メッシュ数は 650 万セル（6659082 cells）を基準とした。

（6）計算条件

ANSYS　FLUENT　Ver.12.0 の標準機能を用いて、定常状態の熱流動解析を実施した。解析の体系が複雑なため、流れ場の計算収束性がきわめて悪かった。そこで、最大繰返し数 3000 回までの化学種濃度、温度の全体的な分布変化の定常性をみながら収束を判断した。同ソフトウェアは並列処理可能のため、本解析では 4 並列処理で実施した。また、流れ場の精度に影響のある対流項の離散化には、一次風上差分法を適用した。そのため、5.1.1（5）に記したように、計算メッシュをできるだけ細かく設定し、精度低下を出来る限り抑制することに努めた。

以下、基礎方程式と解法をまとめて示す。

・基礎方程式

三次元、定常

連続の式、拡散（水素、空気、酸素、アルゴン）を考慮

運動量保存式（非圧縮性 Navier-Stokes 方程式）、重力項有り（浮力考慮）

エネルギー方程式

・解法

離散化：対流項は一次風上差分、粘性項は二次精度中心差分

マトリックス解法：圧力ベース連成

解析コード：ANSYS　FLUENT　Ver12.0

5.1.2　解析結果

塔内空間の水素濃度分布を Fig.5.2 に示す。塔内、水出入口配管内には、密度及び温度差によって 3 次元的な弱い自然対流の発生がみられる。また、ゼオライト層で発生した水素、酸素ガスは、塔内上部へ上昇するとともに、水出入口配管から流入した空気で希釈置換され、一部は空気の流れに随伴されて塔外に流出する。このように塔内の自然対流や密度差に起因する極めて弱いサイフォン現象が起きており、この結果、水素濃度はゼオライト上部空間領域で約 1.29vol%まで上昇するものの、爆発下限界濃度(4vol%)を下回ることを確認した。

塔内の温度分布を Fig.5.3 に示す。ゼオライト層温度では最高 171℃まで上昇するが、水素の自己着火温度（560℃）を十分下回る結果となった。また、吸着塔容器、シールド容器の最高温度は、胴部でそれぞれ 65.9℃、40.2℃となり、構造材料が SUS316 相当であればクリープが懸念される制限温度は大きく下回っている。また、ゼオライト上部空間の混合ガ

スの最高温度はゼオライト層上部で 78.1℃となるが、外部空気等と撹拌されて、ホットスポットはみられない。ベント管、水出入口管の流体温度は、それぞれ 31℃、40℃、27℃であった。

5.2 FLUENT-FLACS 間インターフェースの機能確認

4.4.1 で作成した FLUENT-FLACS 間インターフェースの機能確認として、Fig.5.4 に示す体系を FLACS 上でモデリングし、SUS 容器内で微量発生する水素が滞留した場合の水素濃度分布を予備計算した FLUENT の結果データ（8399501 ノードデータ）から CLOUD ファイルを作成した。本項の FLUENT による解析結果は、インターフェースの機能確認用に実施した予備解析結果であり、5.1 項吸着塔内の水素濃度分布解析結果との関連はない。水素濃度分布を FLUENT による解析結果（Fig.5.5）と FLACS の 0sec における質量分率（Fig.5.6：FLUENT と比較するため X 軸を反転させた）を比較した結果、入力に問題は無く、正しく質量分率が挿入されていることを確認した。また、着火地点を容器中心最下部として FLACS を実行した結果を Fig.5.7-Fig.5.23 に示す。

5.3 FLACS-AUTODYN 間インターフェースの機能確認

4.4.2 で作成した FLACS-AUTODYN 間インターフェースの機能確認を行った結果を示す。

Fig.5.24 に、機能確認に用いた 4.4.2（3）⑧の手順で出力した FLACS の過剰圧分布履歴データファイルの要約ファイル「FLACS_data_check.txt」の内容を示す。

Fig.5.25 に機能確認のための AUTODYN 解析モデル図を示す。内部を表示するため半体系で表示しているが、実際は全体系でモデル化している。構造物は FLACS における形状および位置と同一である。本モデルでは容器を Shell パーツ、水を Lagrange パーツで作成した。図中の番号は機能確認のために設定した過剰圧時刻歴の出力点である。これらの出力点位置に対応する FLACS の要素番号 IC を Table 5.1 にまとめた。Fig.5.26 に Shell 要素の面の方向を示す。Shell 要素の面の方向は、過剰圧が容器内面に負荷されるので、容器内部が裏面となるように設定した。Fig.5.26 のように過剰圧によって容器が変形する方向に矢印が向けばよい。Fig.5.27 に FLACS_BC 境界条件の位置を示す。

Fig.5.28(a)～(f)に主要な時刻におけるパーツ表面に負荷された過剰圧(ユーザー変数 VAR02)コンター図を示す。図中の番号は機能確認のために設定した過剰圧時刻歴の出力点である。水および容器の下部に過剰圧がゼロの部分が表示されているが、この部分は 4.4.2（3）④において FLACS_BC 境界条件を設定していないためである。

Fig.5.29 に Table 5.1 に記載した FLACS の要素番号 IC における過剰圧時刻歴を示す。このグラフは FLACS の過剰圧分布履歴データから各要素番号 IC における過剰圧データを直接抽出して作成したものである。一方、Fig.5.30 に AUTODYN 解析結果における各出力点での過剰圧時刻歴を示す。両者がほぼ一致していることから、本インターフェースは正常に機能していることが確認できる。

Fig.5.31 に計算開始直後の速度ベクトル図を示す。過剰圧の負荷により容器は外側に向けて変形していることがわかる。

６．まとめ

福島第一原子力発電所の汚染滞留水を淡水化するため、放射能源であるセシウムをゼオライトで吸着し除去する汚染水処理システムが稼働している。使用済みの廃ゼオライトは吸着塔に充填したまま長期保管されるが、廃ゼオライトに吸着された水分や吸着塔内の残留水が放射線分解して水素と酸素を発生する。水素の燃焼・爆発に対する安全対策の妥当性を確認するため、吸着塔内の詳細な水素濃度/温度分布を基に、水素燃焼・爆発事故時の事象推移とそれらの影響を解析する水素拡散/燃焼影響評価解析システムを整備した。システムは、汎用熱流動解析コード FLUENT（水素漏洩拡散解析用）、燃焼解析コード FLACS（水素燃焼・爆風解析用）及び動的非線形解析コード AUTODYN（爆轟による構造物への衝撃解析用）と、これらのコード間のデータ受け渡しを行うインターフェースプログラムから構成される。本システムは、廃ゼオライトを充填した吸着塔、一時保管設備（ボックスカルバート）内部における水素の移流拡散、漏えい、着火、燃焼（爆燃及び爆轟）を解析することができ、爆発に伴う構造物への衝撃評価も可能である。

本報では、整備した解析システムの概要と水素拡散解析、燃焼解析、影響評価解析の各コードの特徴、各コードを連成させるために開発したインターフェースの機能について概説した。併せて、機能確認のための予備解析として、ステンレス製円筒容器中での水素混合ガスの自然対流・拡散現象による水素濃度、温度解析例、及び、容器内にて着火が起こった場合における水素燃焼解析による容器内圧力解析例、さらに、水素濃度分布結果を元に容器内で爆ごうが発生した場合の容器の応力解析例を紹介した。

今後、整備したコードシステムを活用して詳細な解析を行い、廃ゼオライト吸着塔の長期保管時における水素対策の妥当性の確認を着実に進めていく予定である。

謝　辞

アンシス・ジャパン(株)　竹内尚哉氏、桜井 旭氏、（株）CTC ソリューションズ　阿部淳氏、（株）爆発研究所の吉田正典氏、菅原　章博氏には、FLUENT、FLCAS、AUTODYN を使用した解析及びインターフェースプログラムの開発に関して御助力を頂きました。また、大洗研福島技術開発特別チーム　茶谷恵治チームリーダー、沢　和弘サブチームリーダーには、本報告書をまとめるにあたり御助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 高レベル放射性汚染水処理設備，貯留設備（タンク等），廃スラッジ貯蔵施設，使用済セシウム吸着塔保管施設及び関連設備（移送配管，移送ポンプ等）,東京電力プレス発表資料（2013.3.12）
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu13_j/images/130312j0301.pdf

2) 福島第一原子力発電所における高濃度の放射性物質を含むたまり水の貯蔵及び処理の状況について（第 1～90 報）,東京電力プレス発表資料（2013.3.13 まで）
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu13_j/images/130313j0201.pdf

3) 放射性滞留水処理システムの概要について, 東京電力プレス発表資料（2011.6.9）
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/110609g.pdf

4) 有馬 由紀、竹内 努、吉野 晃 :「福島第一原子力発電所の汚染水処理システムと東芝の取組み」, 東芝レビュー, Vol.67 No.11, pp.54-58, (2012)

5) 放射性滞留水処理システムの概要（第二セシウム吸着装置の追設）について, 東京電力プレス発表資料（2011.8.3）
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/110803d.pdf

6) 山岸 功、三村 均、出光 一哉 :「福島第一原子力発電所高汚染水の処理処分の課題 処分を見据えた対応策の提言」, 日本原子力学会誌, Vol.54 No.3, pp.166-170, (2012)

7) 伴 康俊、山岸 功、森田 泰治 :「無機吸着剤による塩化ナトリウム水溶液中の Cs 吸着特性」, JAEA-Research 2011-037 (2012)

8) 福島第一原子力発電所第 1～4 号機に対する「中期的安全確保の考え方」に基づく施設運営計画に係る報告書（その 3）（改訂）, 東京電力プレス発表資料（2012.3.7）
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu12_j/images/120307d.pdf

9) 多核種除去設備（ALPS）確証試験及び設備設計の状況, 政府・東京電力中長期対策会議運営会議（第 8 回会合）資料 3-2（2012.7.30）
http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/120730/120730_01k.pdf

10) 福島第一原子力発電所放射性滞留水の回収・処理の取組み ～水処理（放射能除去）の仕組み～, 東京電力報道配付資料（2011.10.29）
http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_111029_02-j.pdf

11) 東京電力株式会社福島第一原子力発電所における敷地境界線量低減に向けた計画等に係る報告, 東京電力プレス発表資料（2012.9.21）
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu12_j/images/120921j0301.pdf

12) http://ansys.jp/products/fluid/fluent/

13) http://ansys.jp/products/workbench/index.html

14) “FLACS v10.0 User’s Manual” GexCon AS January 15 2013

15) http://www.gexcon.com/flacs-software

16) “Review of FLACS version 9.0 Dispersion modeling capabilities” HSE research report RR779

17) http://bakuhatsu.jp/software/flacs/

18) http://www.hysafe.org/
19) http://www.engineering-eye.com/AUTODYN/index.html
20) 衝撃解析ソフトウェア ANSYS AUTODYN ファーストステップ・チュートリアル(第４版)、伊藤忠テクノソリューションズ株式会社
21) 伝熱工学資料改訂第４版
22) S.Ergun., "Fluid flow through Packed Columns",Chem.Eng.Prog.,4882,pp.89-94,1952.
23) 電中研,私信.2012.7.12
24) JAEA　原子力基礎工学研究部門,私信,2011.5.11

Table 5.1 過剰圧時刻歴出力点に対応する FLACS の要素番号 IC

AUTODYN	FLACS						
出力点#	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	I	J	K	要素番号 IC
1	-100～-50	-100～-50	200～250	11～12	11～12	5～6	11005
5	450～500	-50～0	800～850	22～23	12～13	17～18	22677
6	-50～0	-500～-450	800～850	12～13	3～4	17～18	11721
7	-500～-450	-50～0	800～850	3～4	12～13	17～18	2613
11	-100～-50	-150～-100	1450～1500	11～12	10～11	30～31	10986

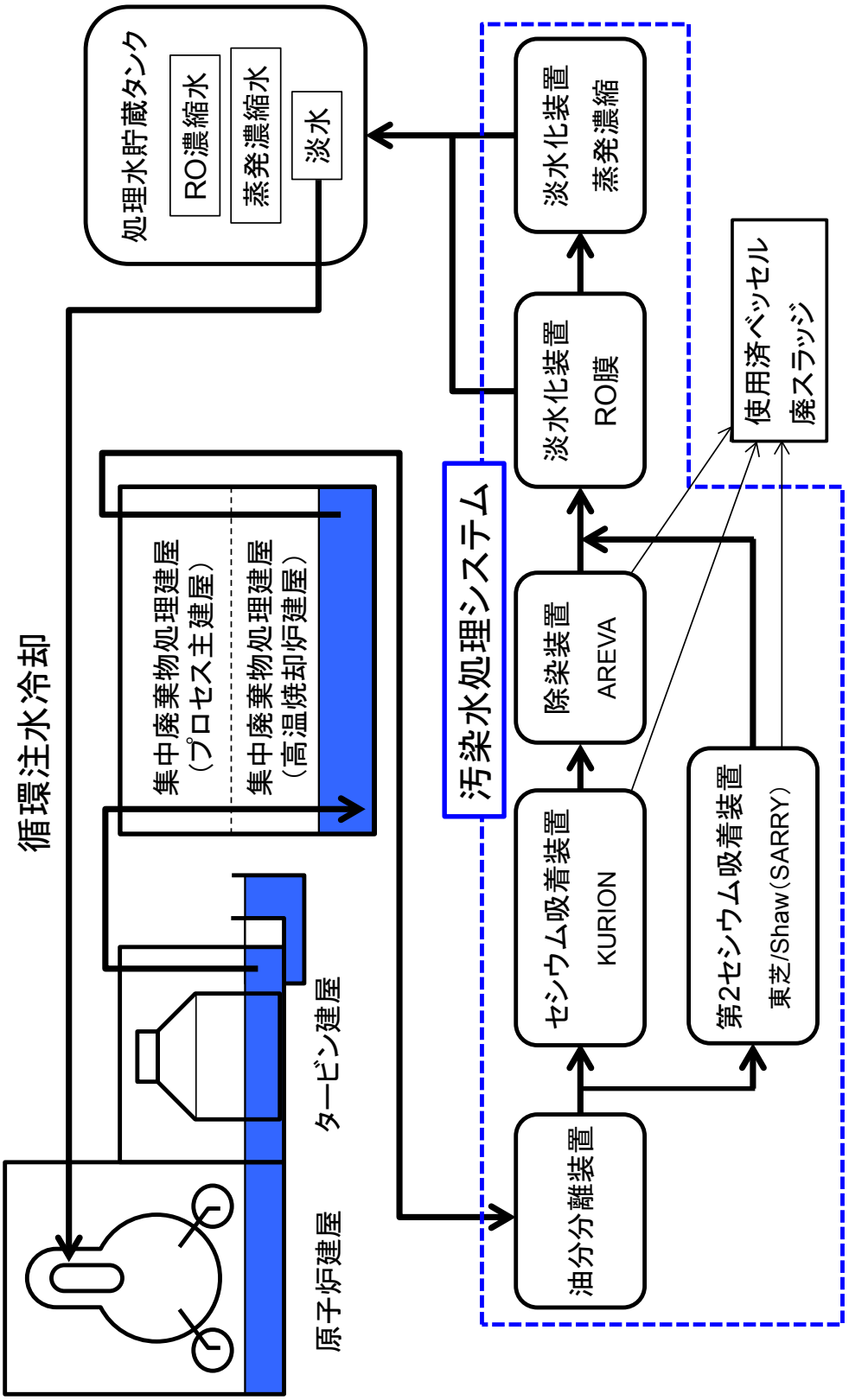


Fig.2.1 汚染水処理設備等の全体概要図（系統概要図）[1),2)]

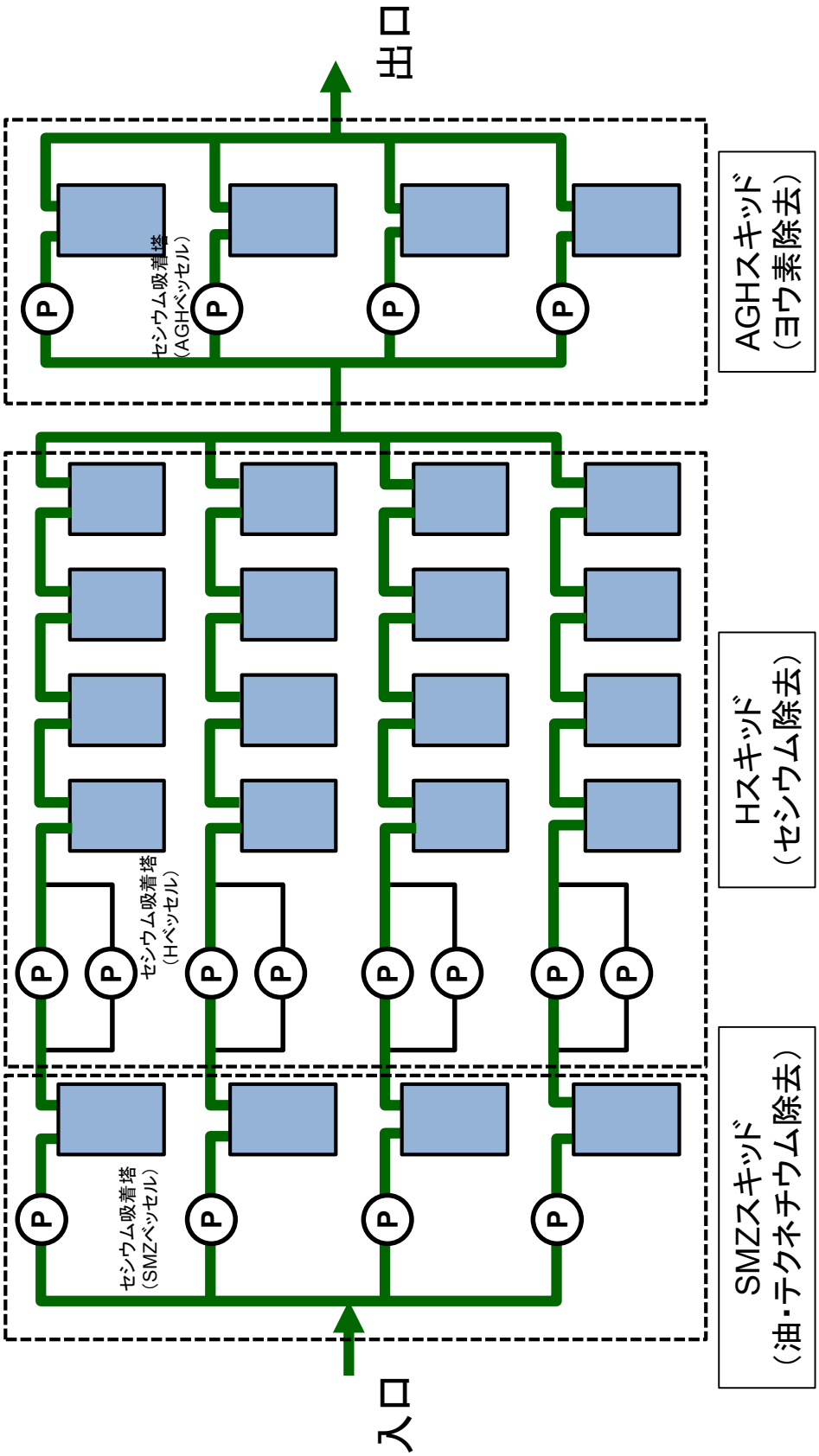


Fig.2.2 セシウム吸着塔の系統構成図 [1)]

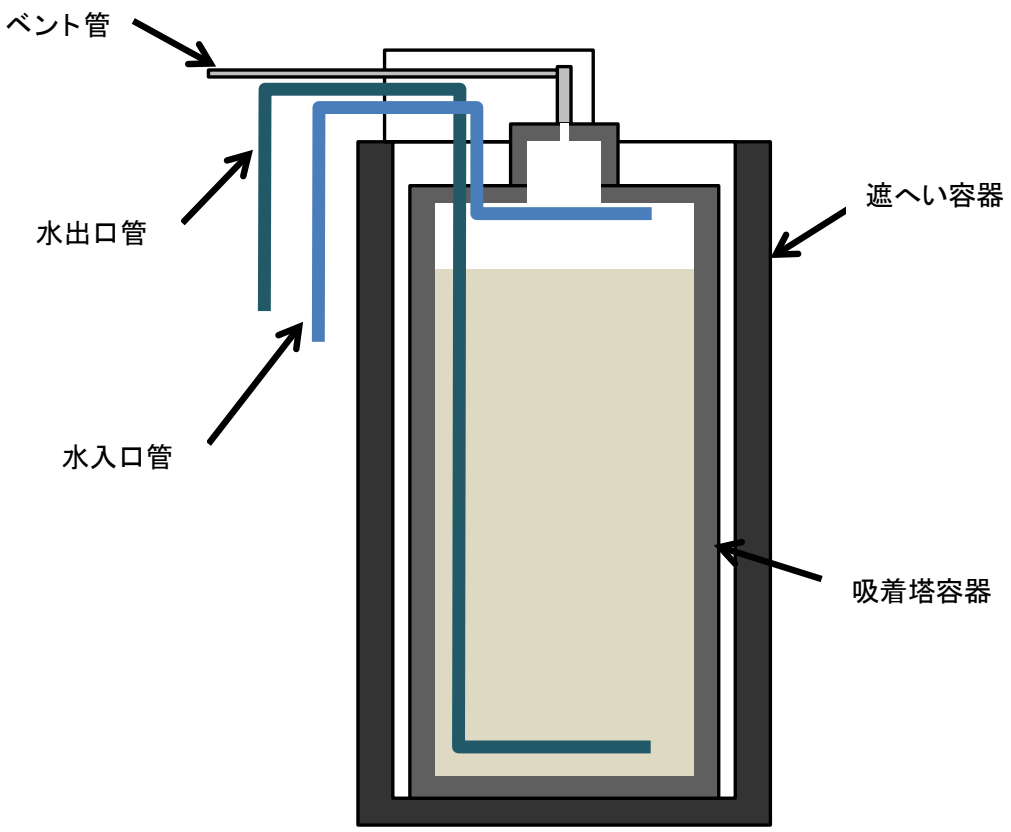


Fig.2.3 セシウム吸着塔の概略図

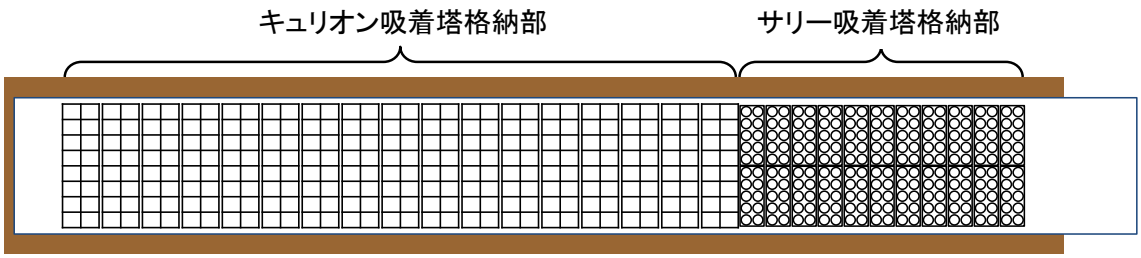


Fig.2.4 使用済みセシウム吸着塔一時保管施設概要図 [1)]

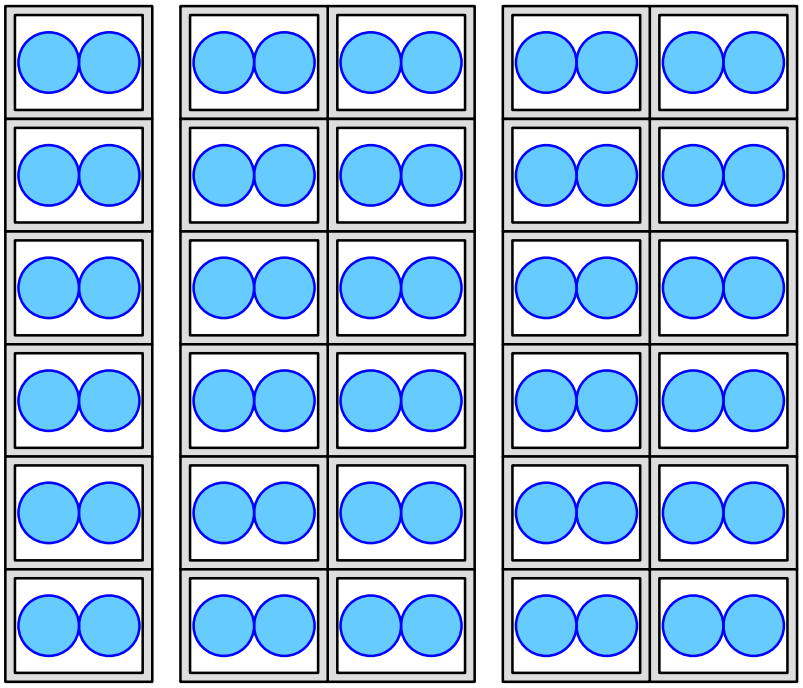


Fig.2.5 コンクリート製ボックスカルバート [1)]

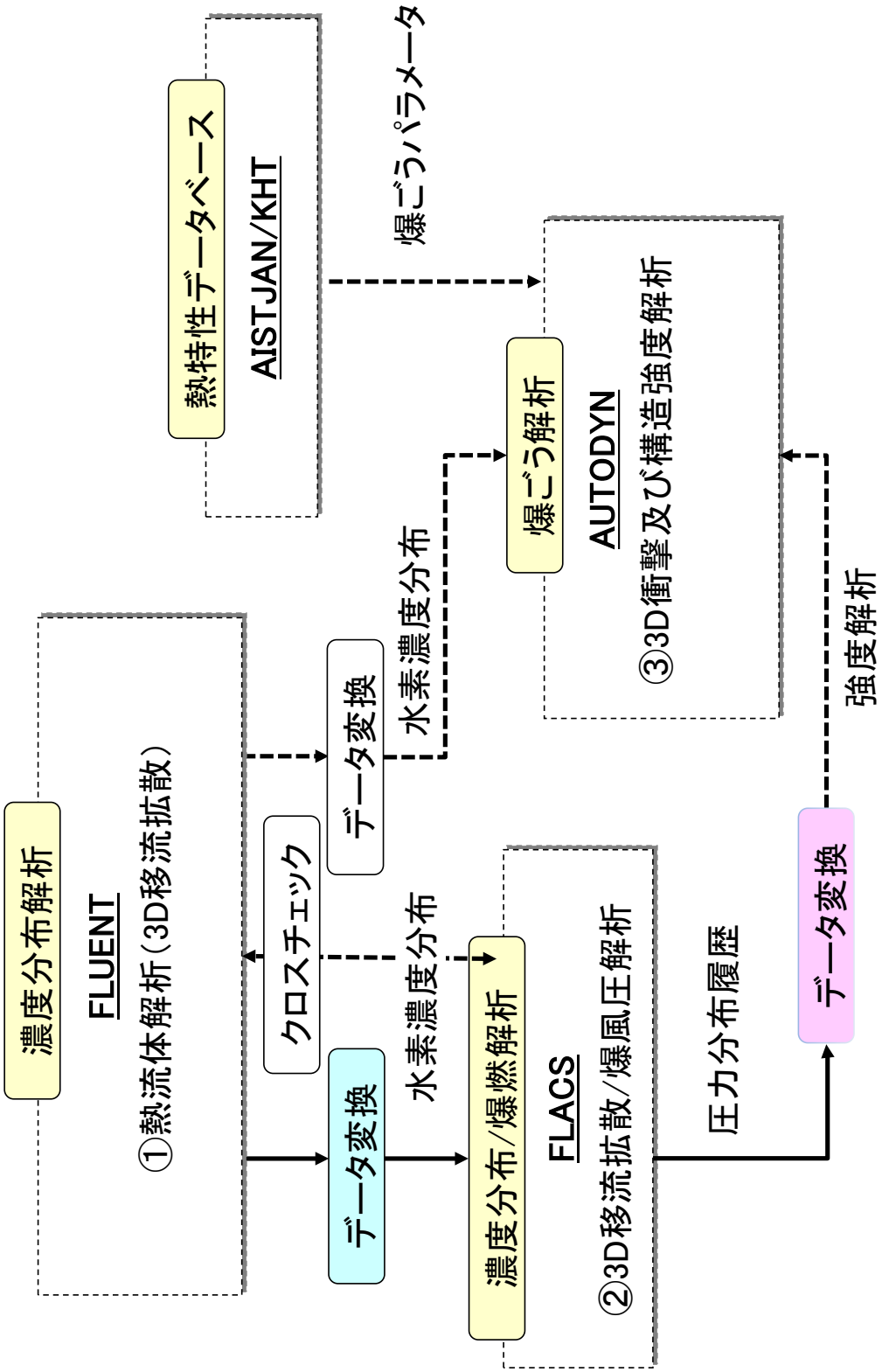


Fig.4.1 水素拡散/燃焼影響評価システムの構成

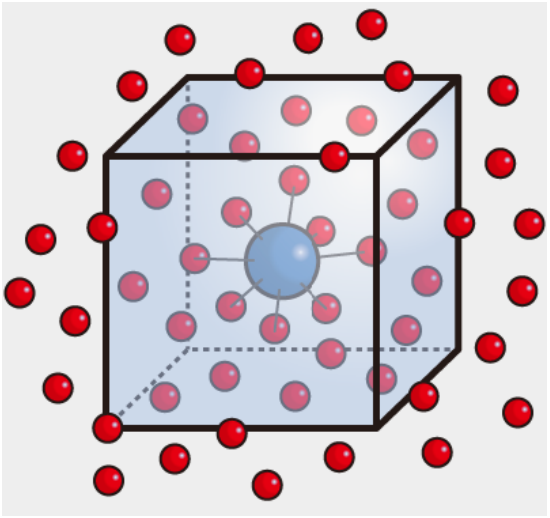


Fig.4.2 FLUNET Node データからの FLACS Cell 中心データの抽出

3	:FLUENT 入力ファイルの数
sample-1	:FLUENT 入力ファイル名（上記ファイル数の数だけ必要）
sample-2	
sample-3	
a3000001.PORV	:FLACS の porocity dat ファイル名
a3000001	:出力ファイル名（拡張子を除く）

Fig.4.3 FLUNET-FLACS 間インターフェースプログラム
入力ファイル記述例

```
-----------------------------------------------------------[ファイル始め]--
NX NY NZ                                  :計算格子(メッシュ)の X/Y/Z 方向の要素数
(X(I),I=1,NX+1)                           :X 方向の格子点座標、NX+1 個、単位:mm
(Y(J),J=1,NY+1)                           :Y 方向の格子点座標、NY+1 個、単位:mm
(Z(K),K=1,NZ+1)                           :Z 方向の格子点座標、NZ+1 個、単位:mm
NT                                                :出力時刻数
(T(IT),IT=1,NT)                           :出力時刻、NT 個、単位：ms
NC                                                :要素数(NC=NX*NY*NZ)
1 (P(1,IT),IT=1,NT)
2 (P(2,IT),IT=1,NT)
・・・
・・・
IC (P(IC,IT),IT=1,NT)                     :要素番号 IC および各時刻 IT における過剰圧
                                          (ゲージ圧)、NT 個、単位:kPa
・・・                                     １つの要素番号におけるすべての出力時刻での
                                          過剰圧を１行に出力
・・・
NC (P(NC,IT),IT=1,NT)
-----------------------------------------------------------[ファイル終り]--
```

Fig.4.4 過剰圧分布履歴データファイルのフォーマット

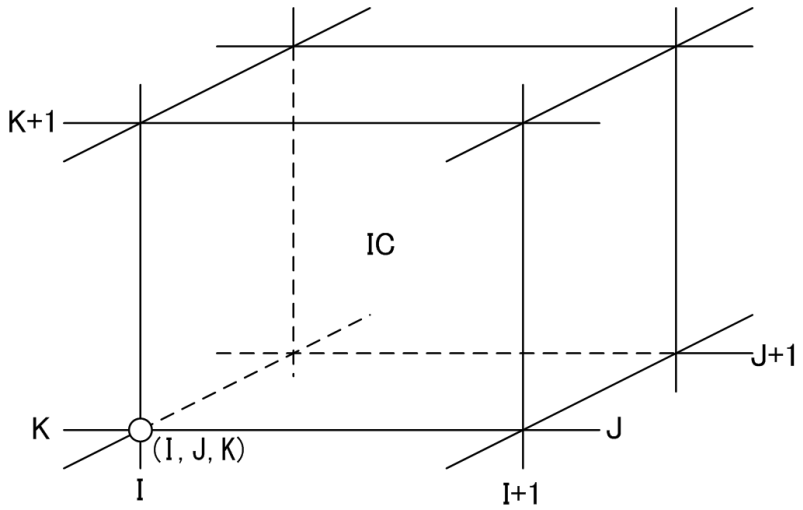


Fig.4.5 計算要素番号 IC と格子点番号(I,J,K)の関係

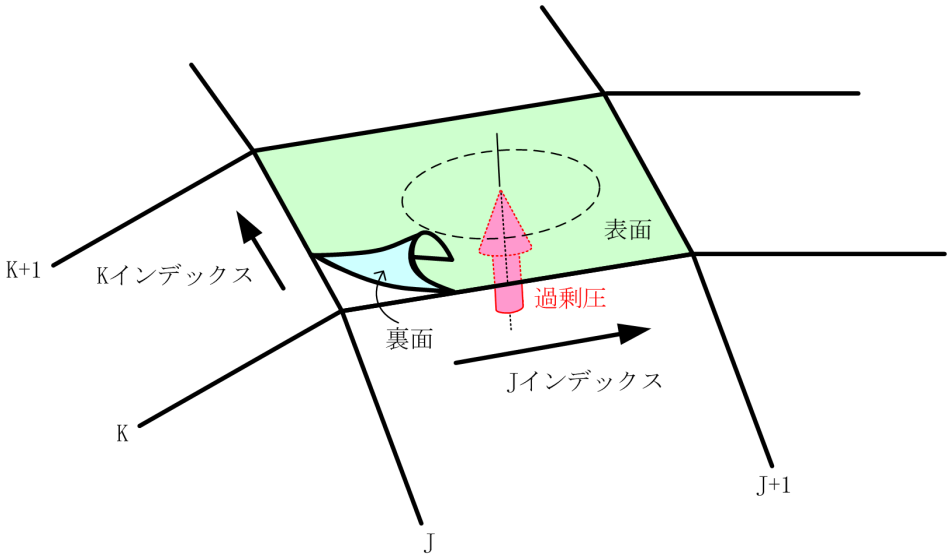


Fig.4.6 Shell パーツの面の定義

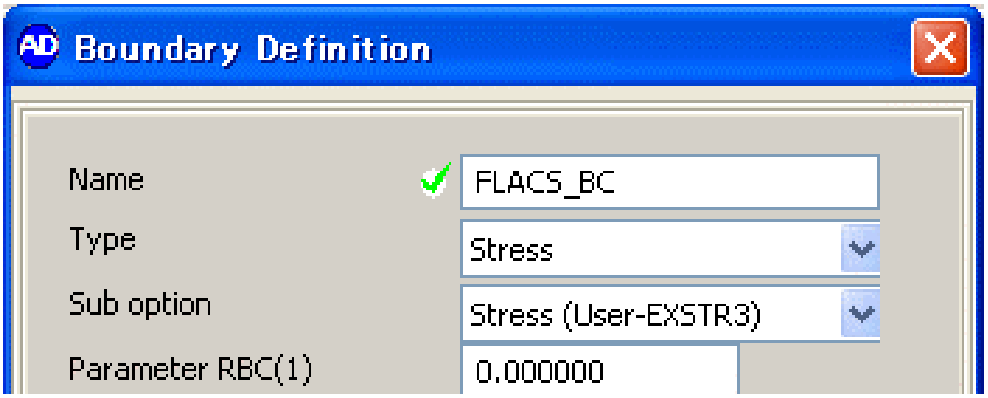


Fig.4.7 境界条件の設定

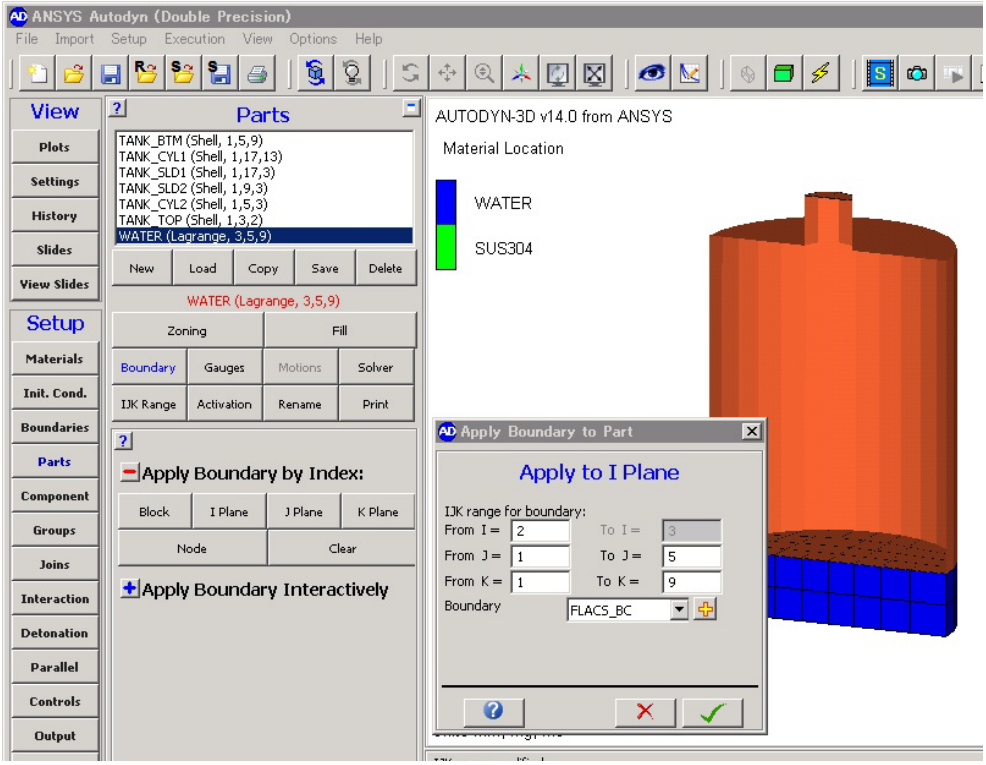


Fig.4.8 FLACS_BC 境界条件のパーツへの設定

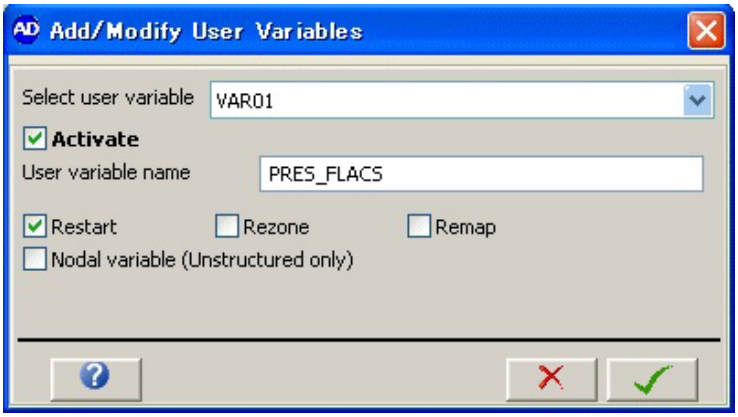


Fig.4.9 ユーザ変数の設定

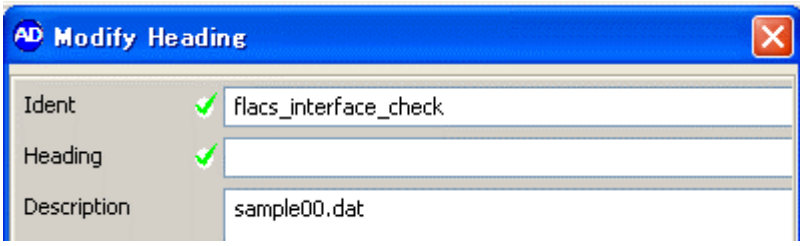
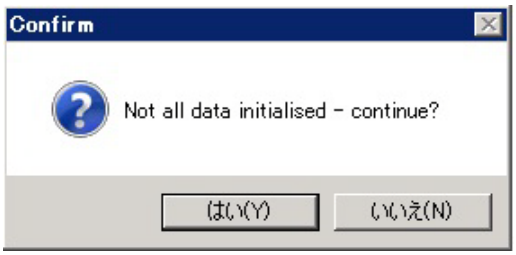
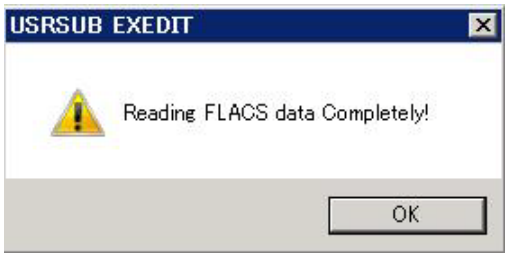


Fig.4.10 過剰圧分布履歴データファイル名の入力



(a) 確認メッセージ(その 1)



(b) 確認メッセージ(その 2)

Fig.4.11 確認メッセージ

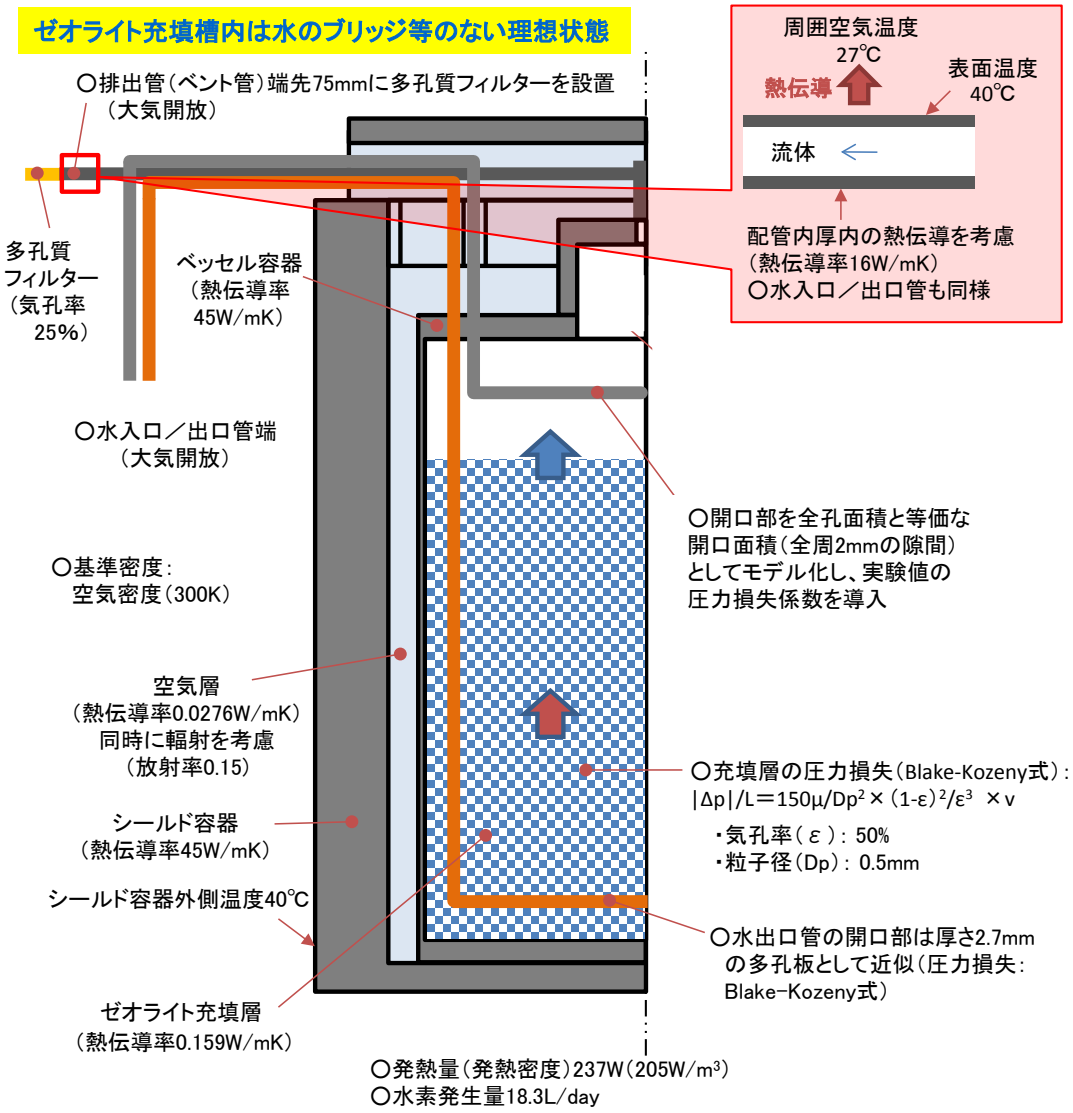

ゼオライト充填槽内は水のブリッジ等のない理想状態
○排出管（ベント管）端先75mmに多孔質フィルターを設置
（大気開放）
多孔質
フィルター
（気孔率
25%）
ベッセル容器
（熱伝導率
45W/mK）
○水入口／出口管端
（大気開放）
○基準密度：
空気密度（300K）
空気層
（熱伝導率0.0276W/mK）
同時に輻射を考慮
（放射率0.15）
シールド容器
（熱伝導率45W/mK）
シールド容器外側温度40℃
ゼオライト充填層
（熱伝導率0.159W/mK）
○発熱量（発熱密度）237W（205W/m³）
○水素発生量18.3L/day
周囲空気温度
27℃
熱伝導
表面温度
40℃
流体
配管内厚内の熱伝導を考慮
（熱伝導率16W/mK）
○水入口／出口管も同様
○開口部を全孔面積と等価な
開口面積（全周2mmの隙間）
としてモデル化し、実験値の
圧力損失係数を導入
○充填層の圧力損失（Blake-Kozeny式）：
|Δp|/L＝150μ/Dp²×（1-ε）²/ε³ ×v
・気孔率（ε）：50%
・粒子径（Dp）：0.5mm
○水出口管の開口部は厚さ2.7mm
の多孔板として近似（圧力損失：
Blake-Kozeny式）

Fig.5.1 境界条件

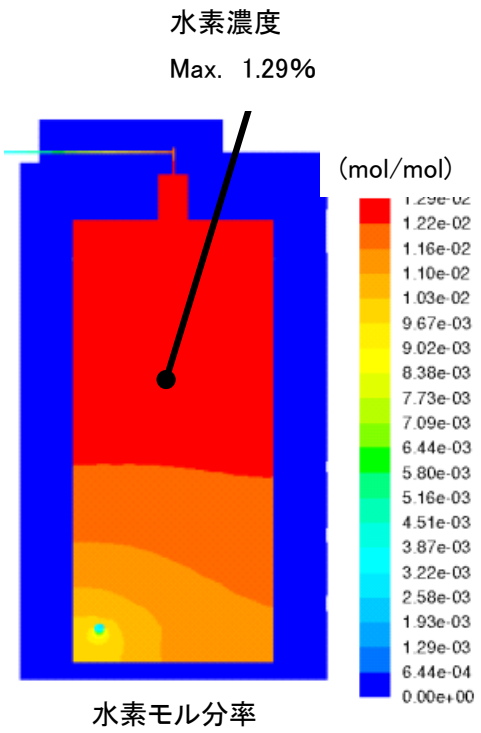


Fig.5.2 水素濃度分布計算例

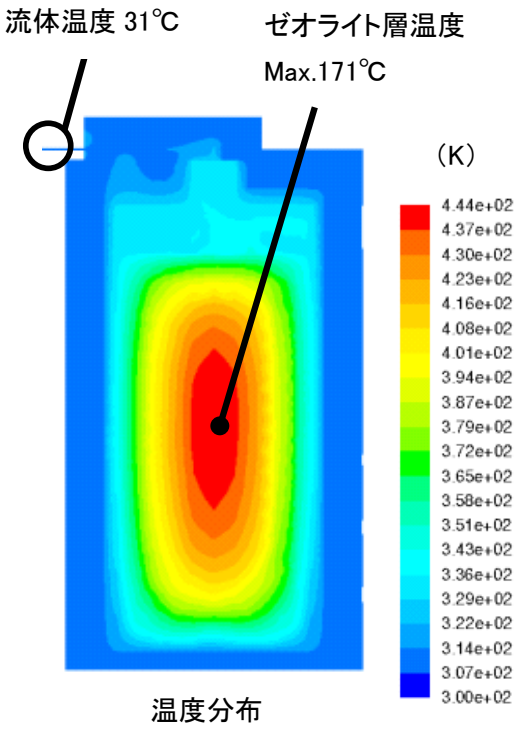


Fig.5.3 温度分布計算例

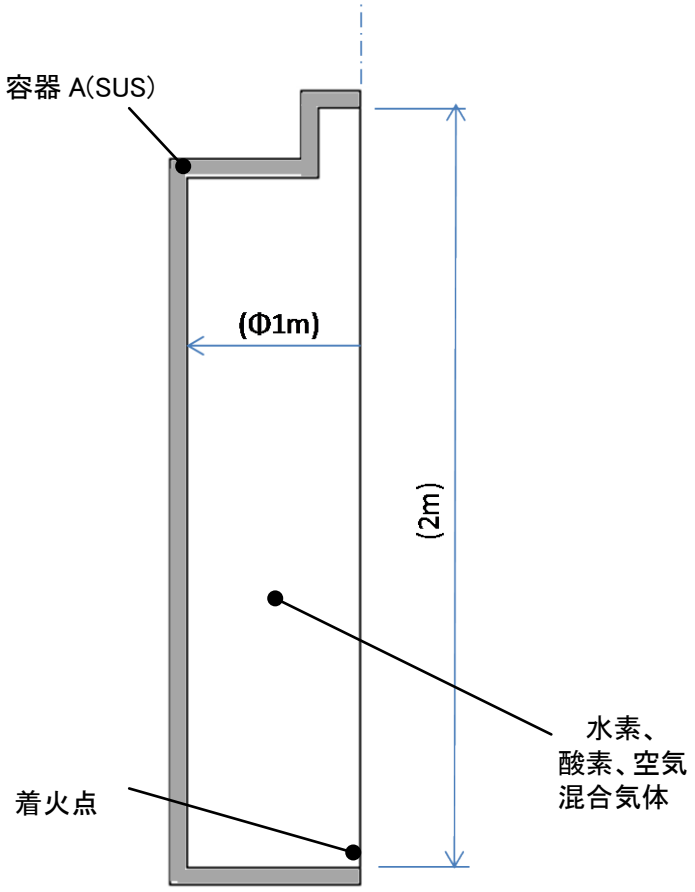


Fig.5.4 インターフェース確認用モデル

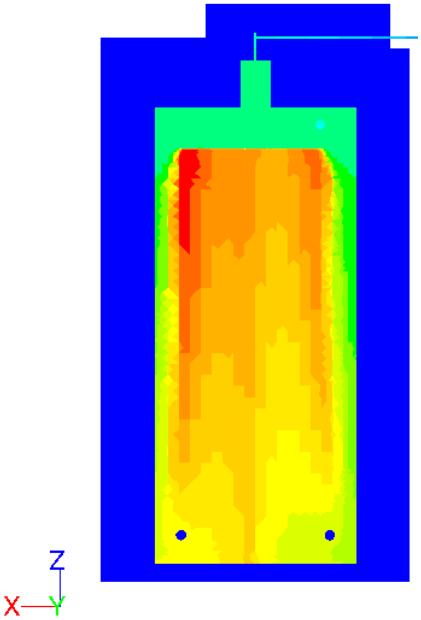


Fig.5.5 FLUENT による解析結果

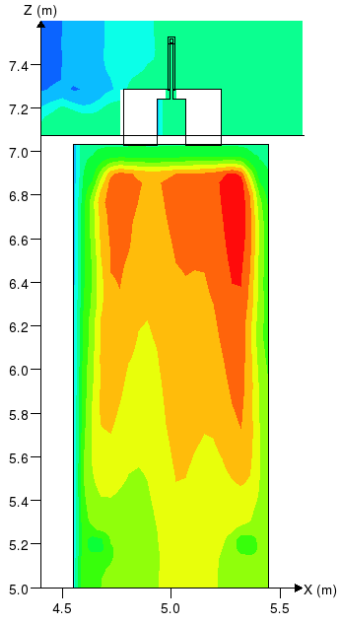


Fig.5.6 FLACS による質量分率結果

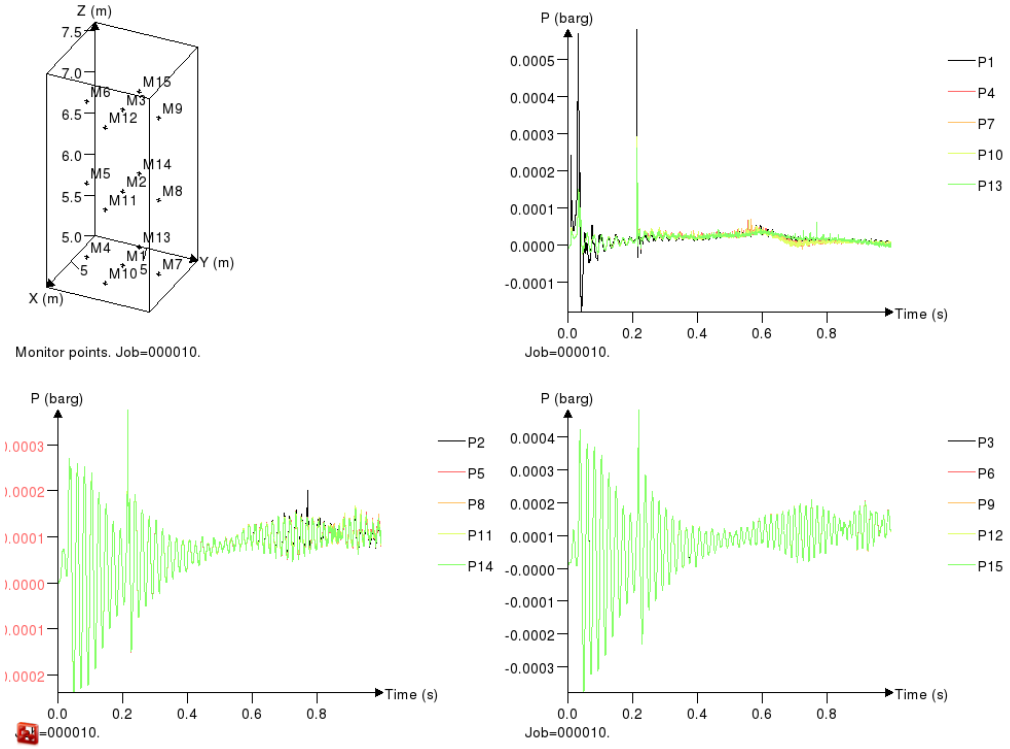


Fig.5.7 爆風圧時刻歴

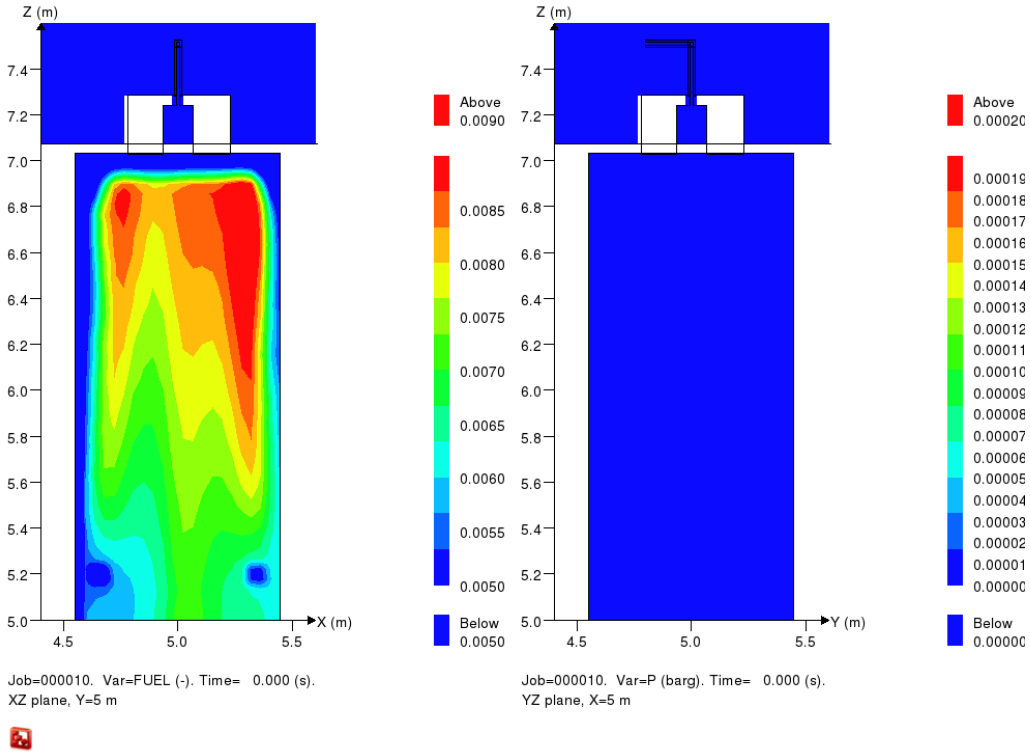


Fig.5.8 燃料質量分率、圧力 0[sec]

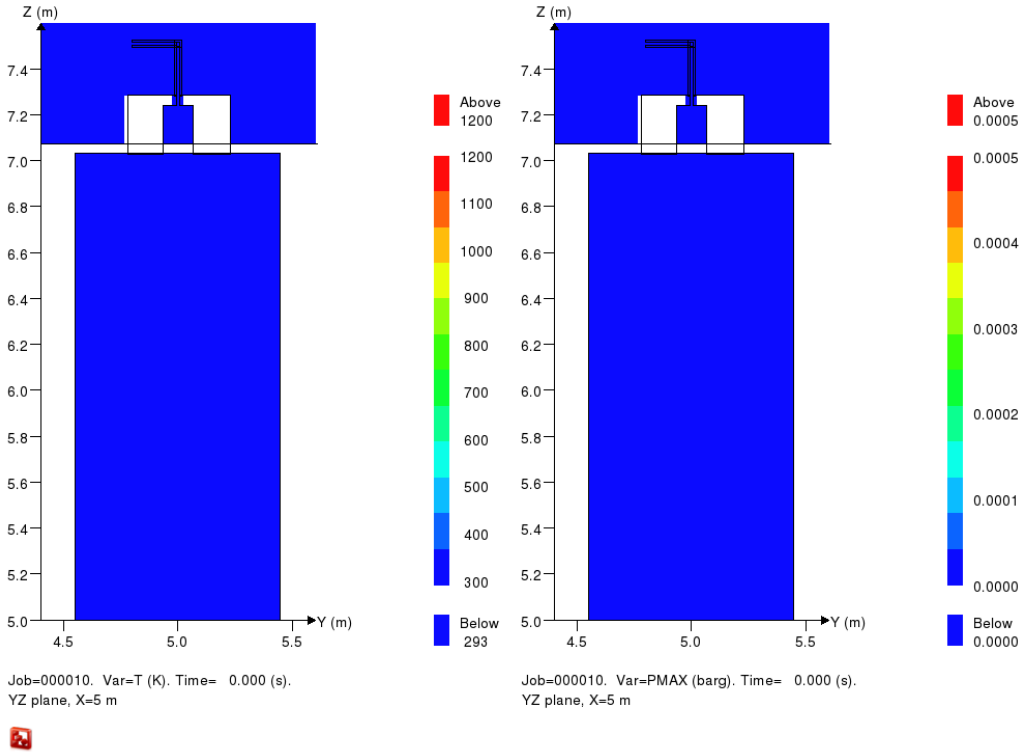


Fig.5.9 最大温度、最大圧力 0[sec]

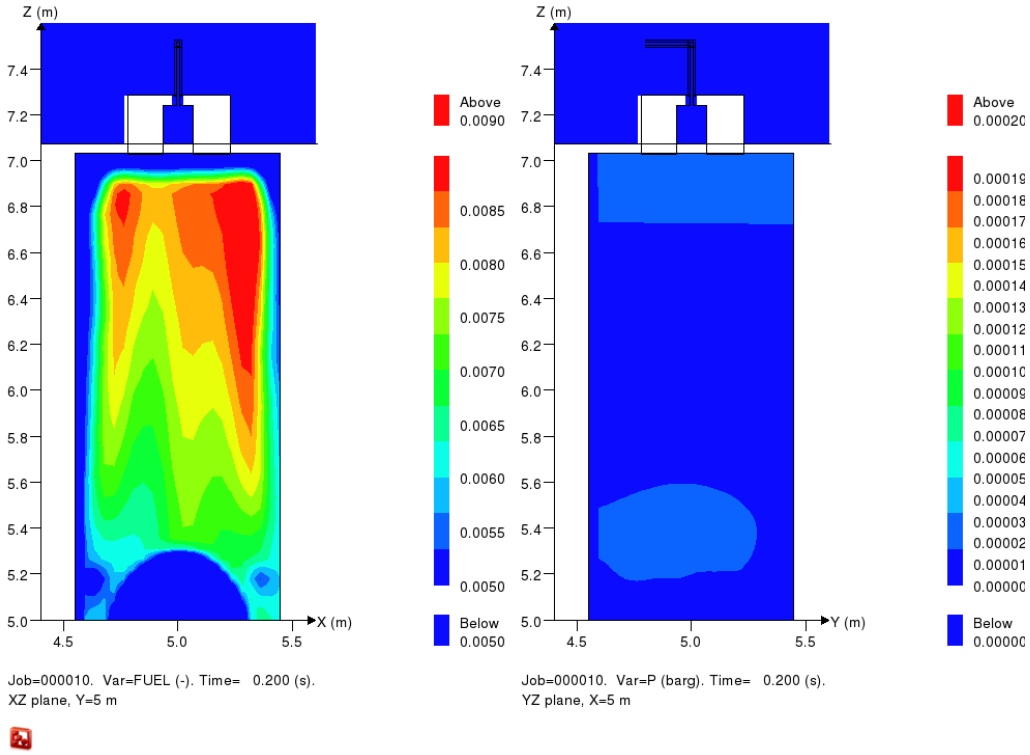


Fig.5.10 燃料質量分率、圧力 0.2[sec]

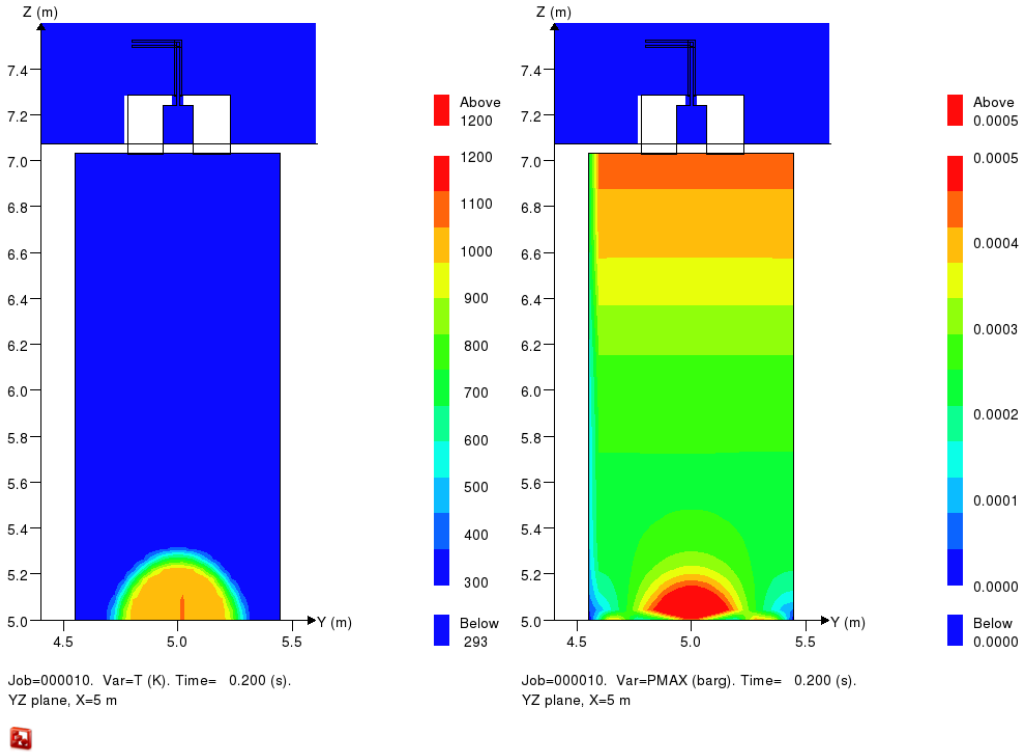


Fig.5.11 最大温度、最大圧力 0.2[sec]

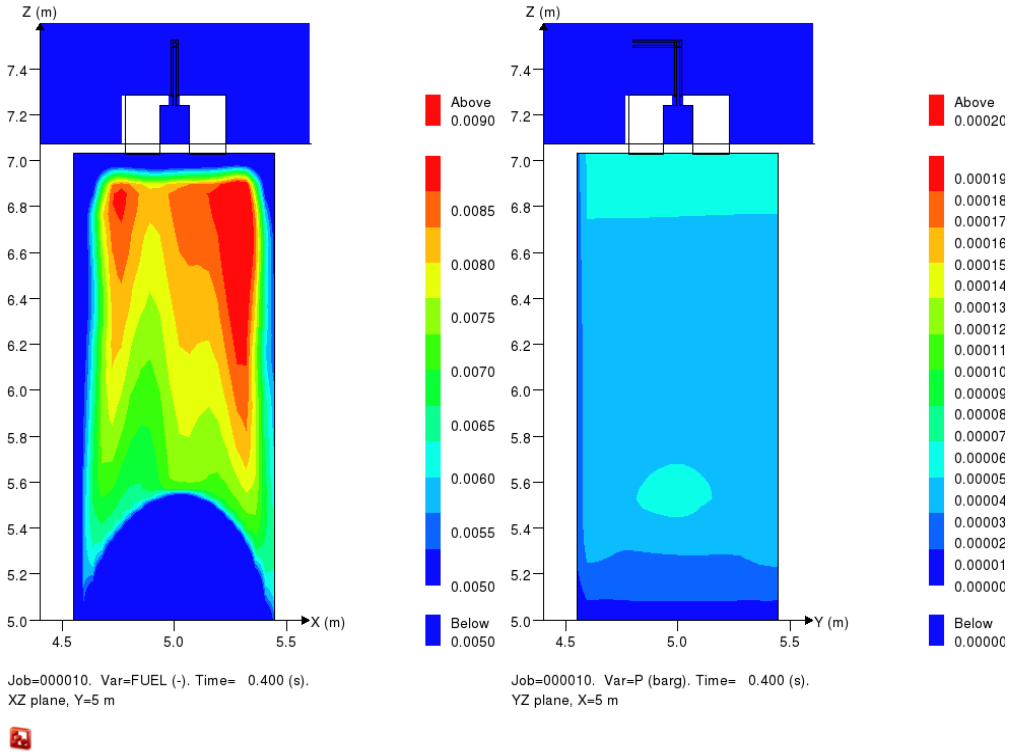


Fig.5.12 燃料質量分率、圧力 0.4[sec]

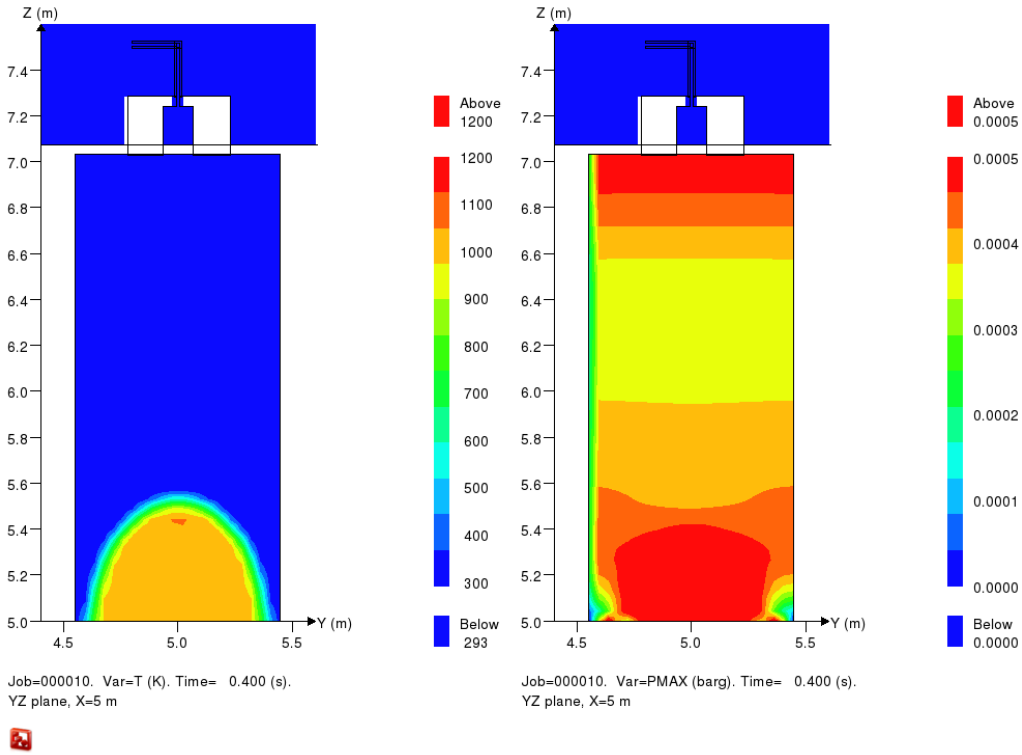


Fig.5.13 最大温度、最大圧力 0.4[sec]

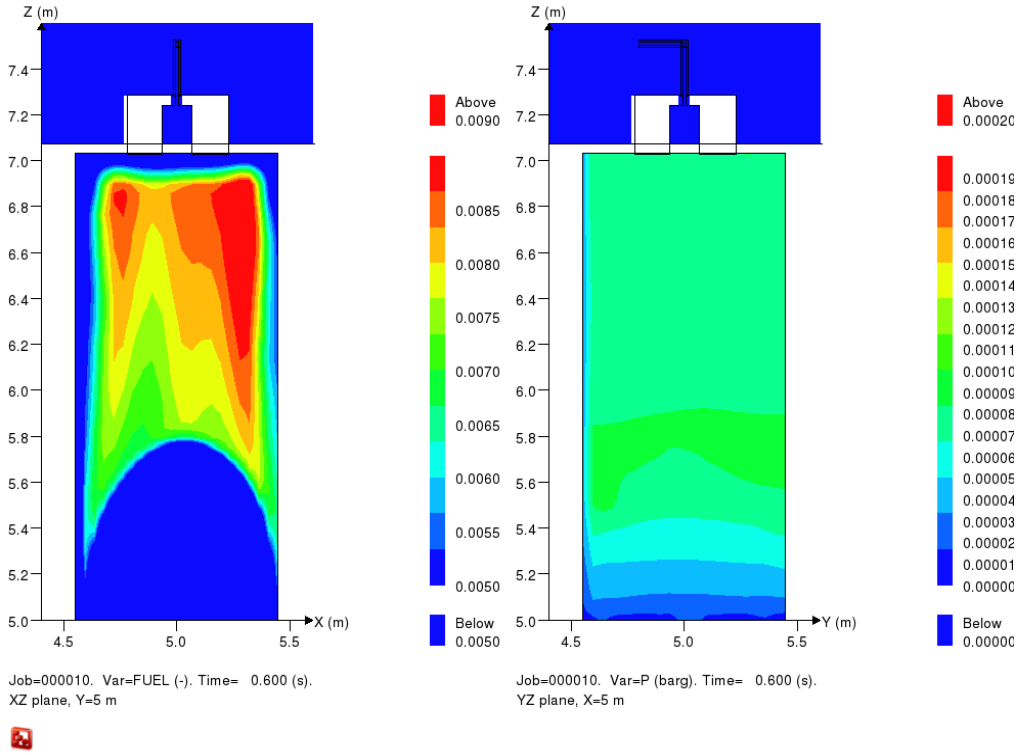


Fig.5.14 燃料質量分率、圧力 0.6[sec]

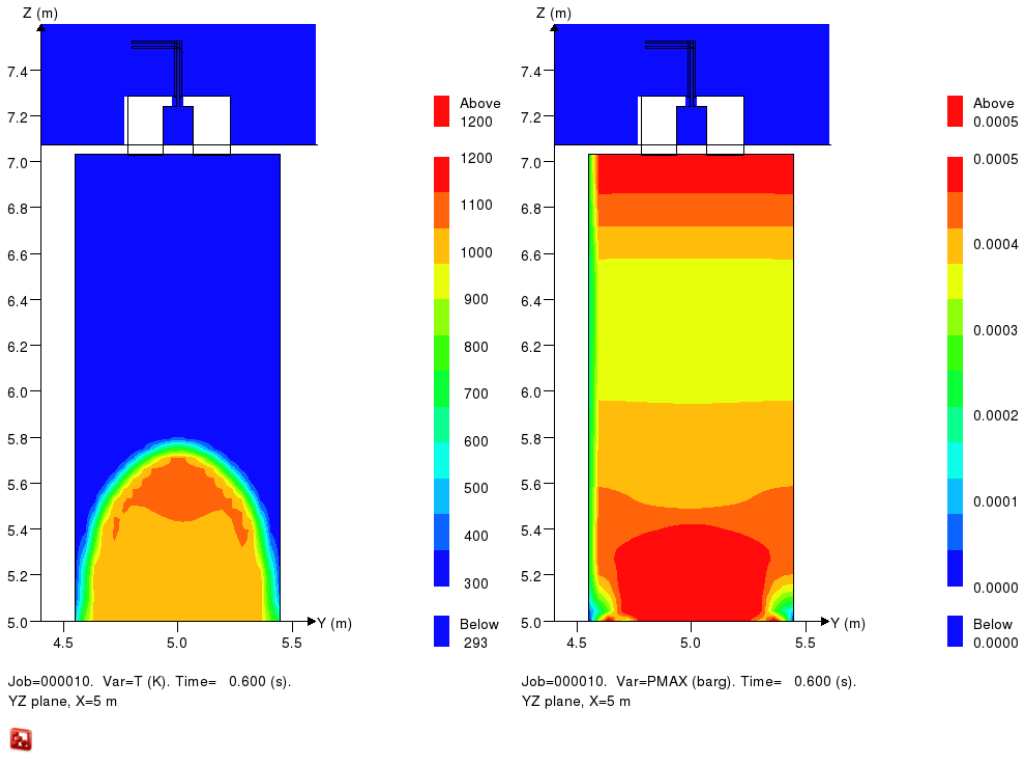


Fig.5.15 最大温度、最大圧力 0.6[sec]

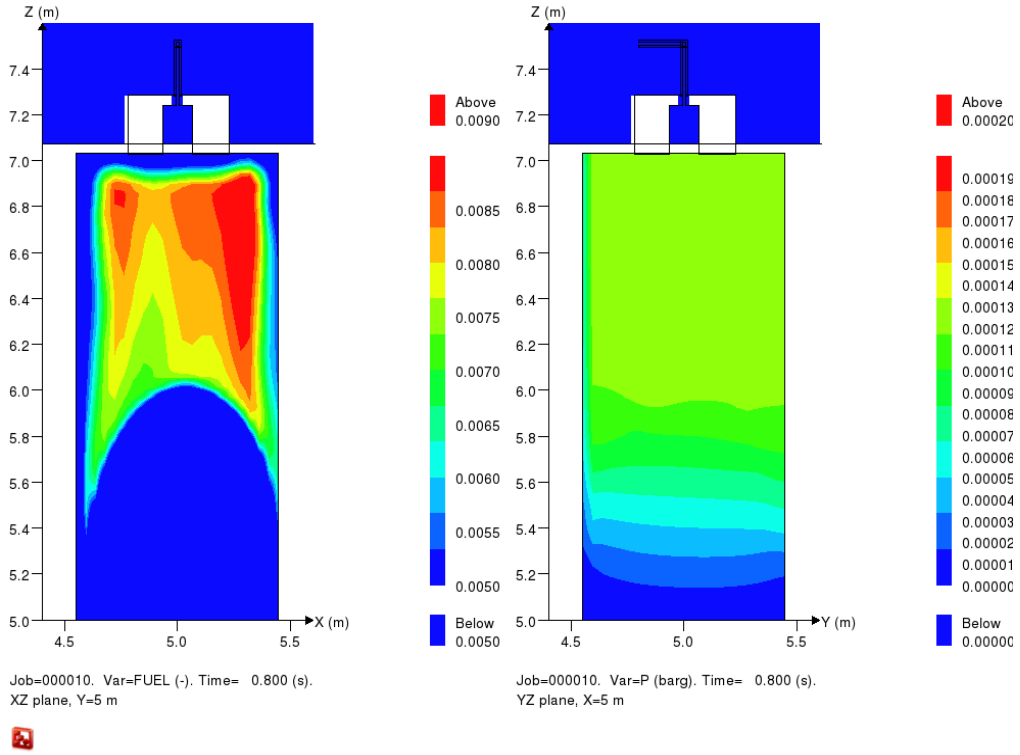


Fig.5.16 燃料質量分率、圧力 0.8[sec]

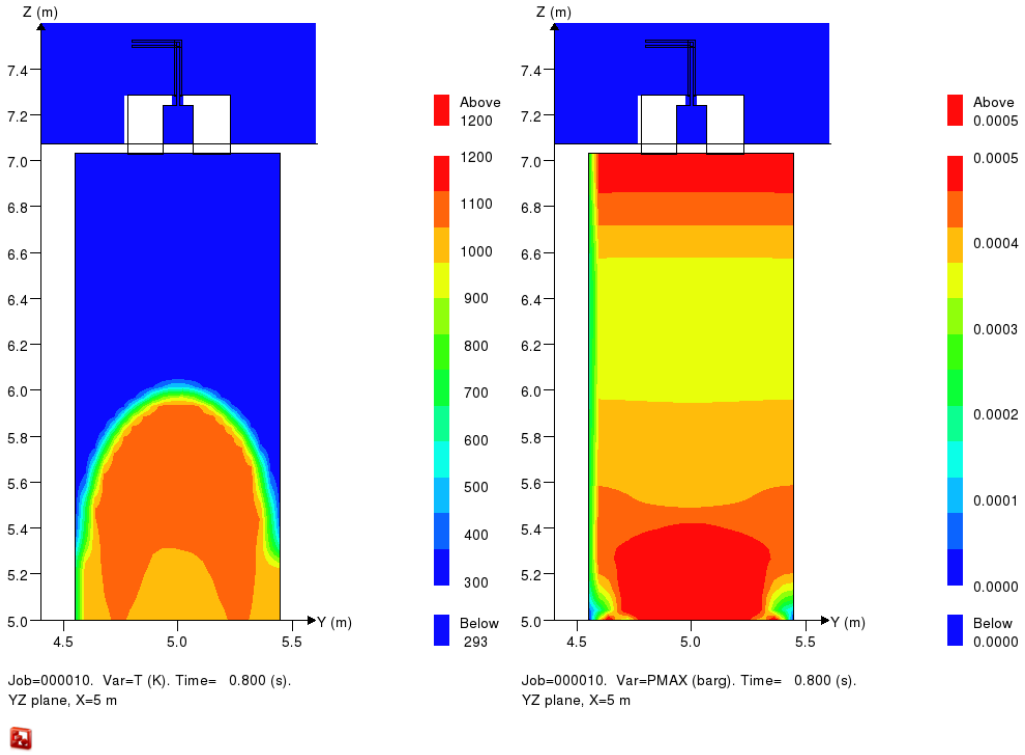


Fig.5.17 最大温度、最大圧力 0.8[sec]

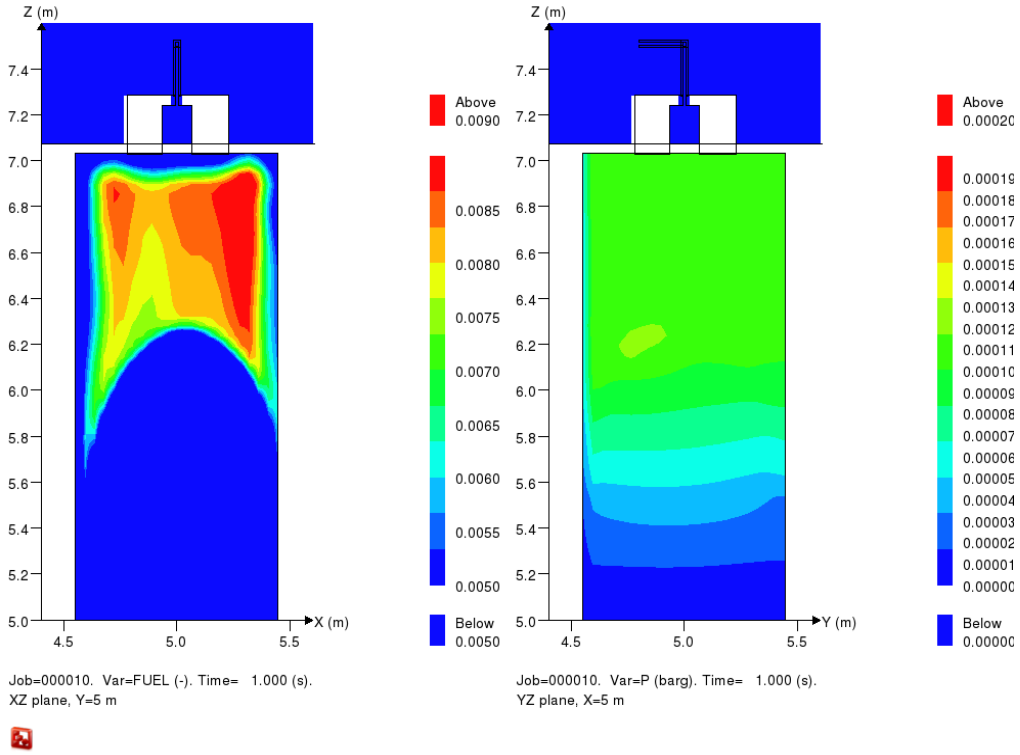


Fig.5.18 燃料質量分率、圧力 1.0[sec]

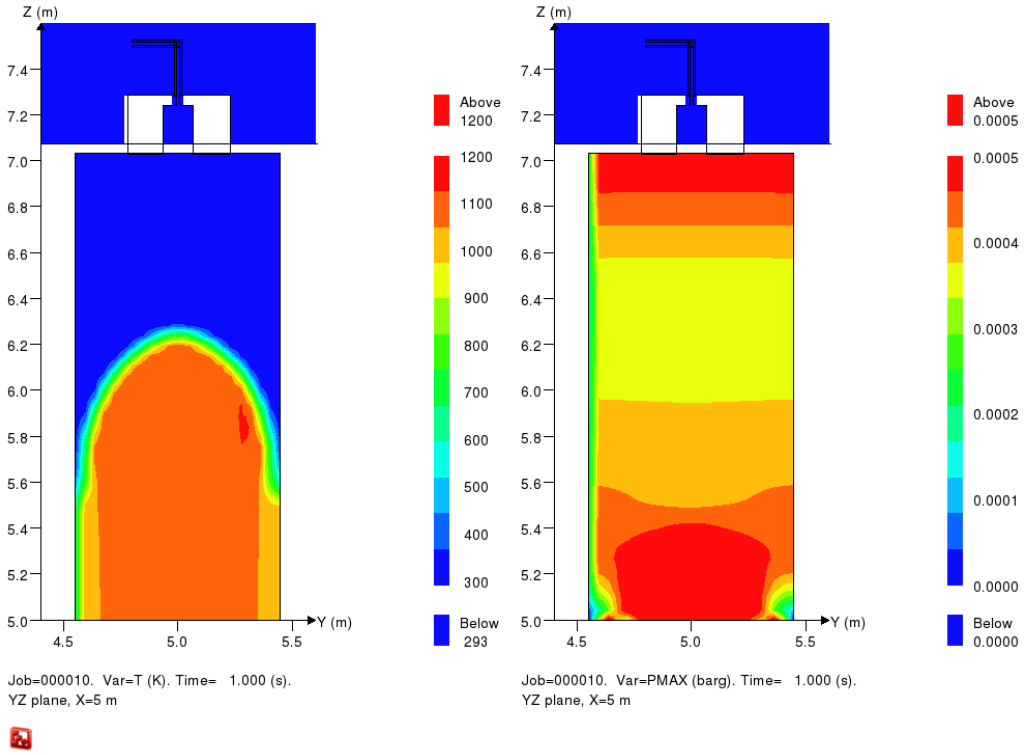


Fig.5.19 最大温度、最大圧力 1.0[sec]

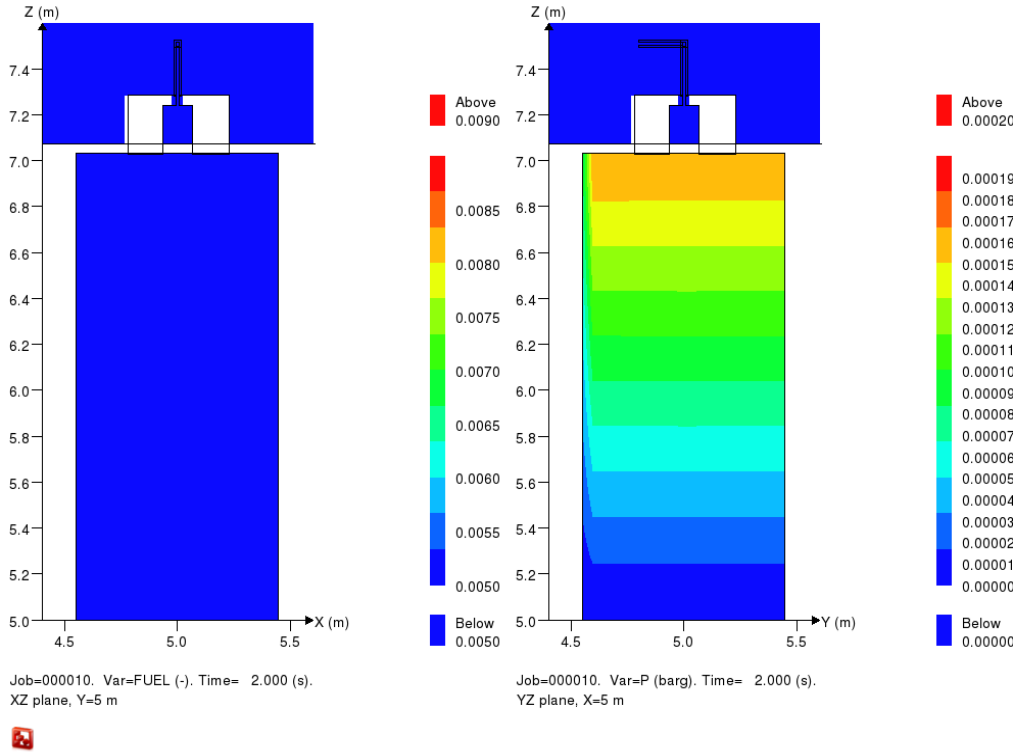


Fig.5.20 燃料質量分率、圧力 2.0[sec]

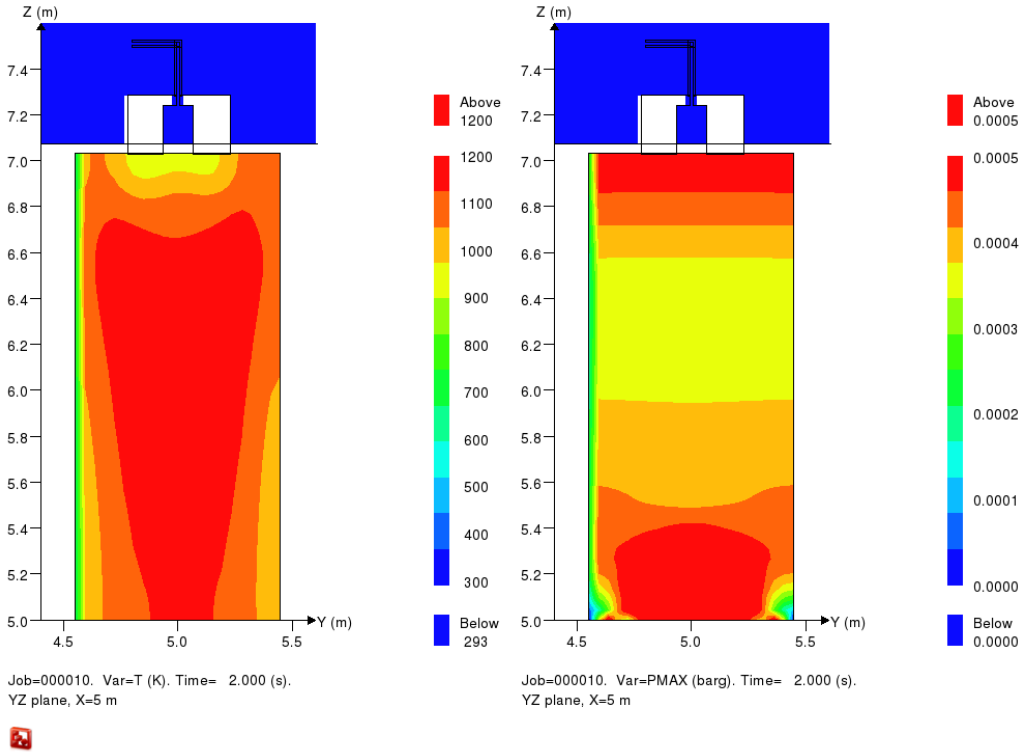


Fig.5.21 最大温度、最大圧力 2.0[sec]

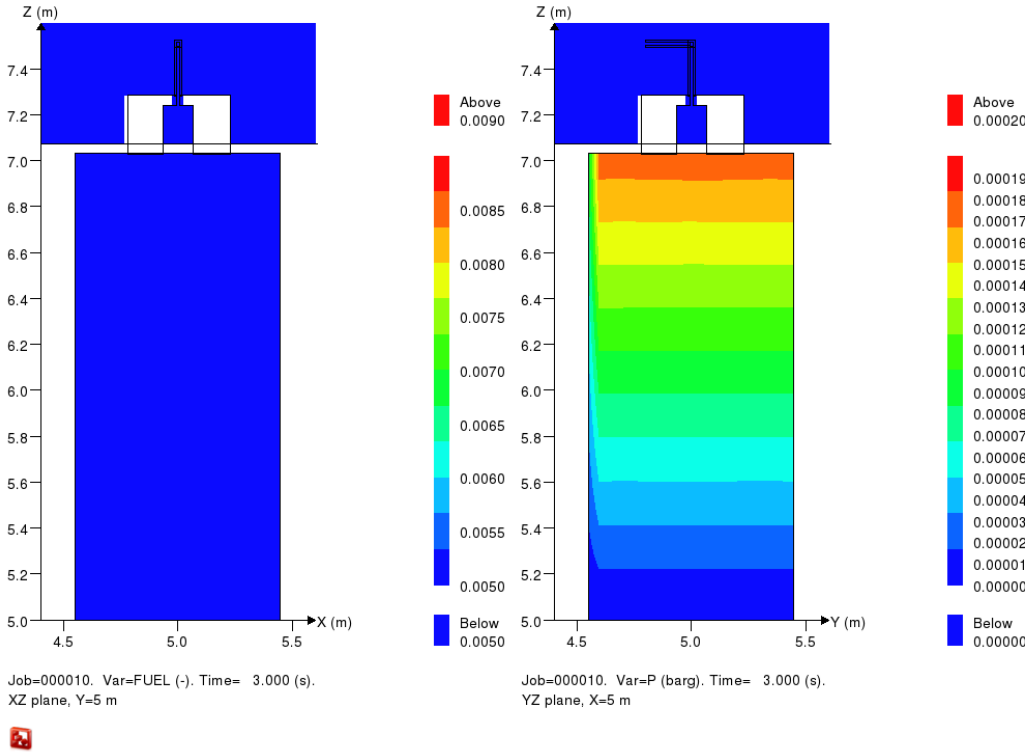


Fig.5.22 燃料質量分率、圧力 3.0[sec]

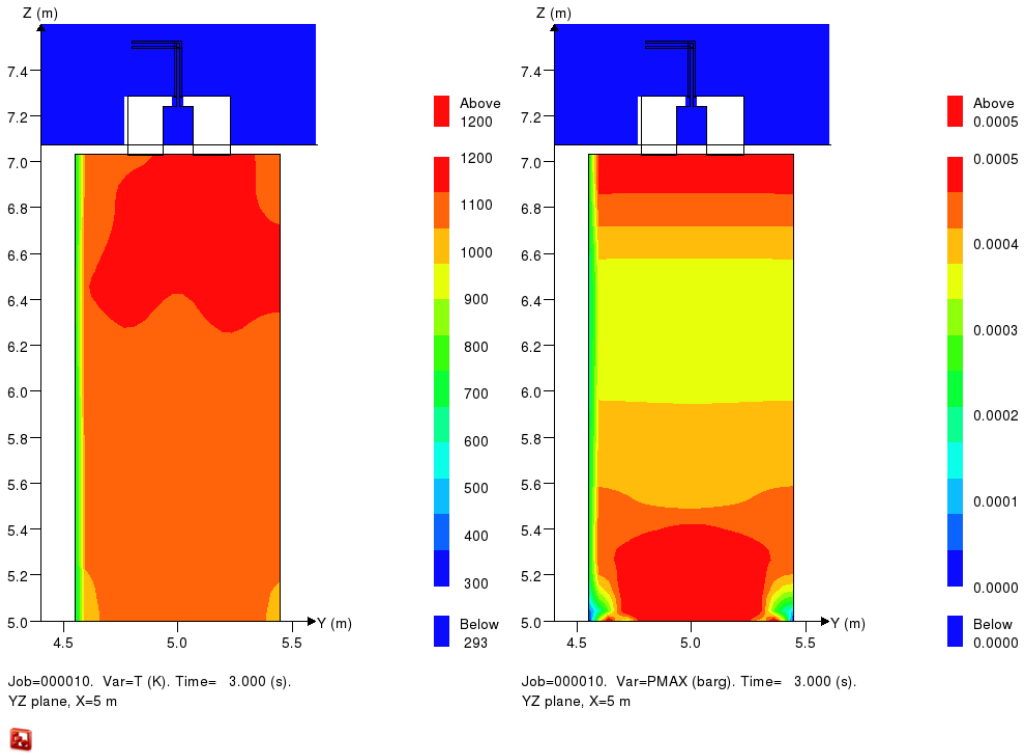


Fig.5.23 最大温度、最大圧力 3.0[sec]

```
-----------------------------------------------------------[ファイル始め]--
NX,NY,NZ=       24       24       44
XMIN,XMAX= -600.0000          599.9998
YMIN,YMAX= -600.0000          599.9998
ZMIN,ZMAX=    0.000000          2200.000
# OF TIME =       401
TMIN,TMAX=    0.000000          1999.897
# OF CELL =    25344
PMIN,PMAX= -1.321454          3.757682
AVE. CELL SIZE=    49.99999
-----------------------------------------------------------[ファイル終り]--
```

Fig.5.24 テキストファイル「FLACS_data_check.txt」の内容

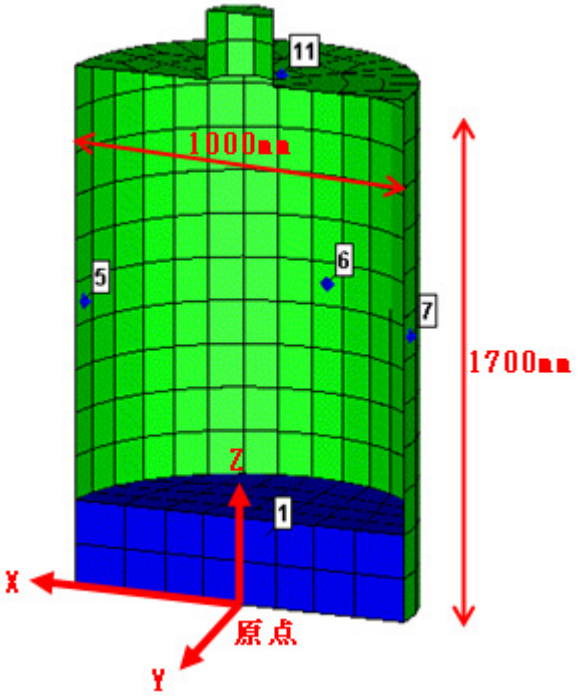


Fig.5.25 機能確認のための AUTODYN 解析モデル図

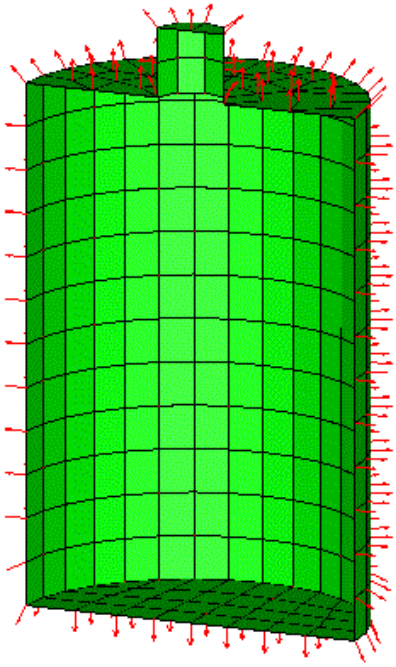


Fig.5.26 Shell 要素の面の方向（水は非表示）

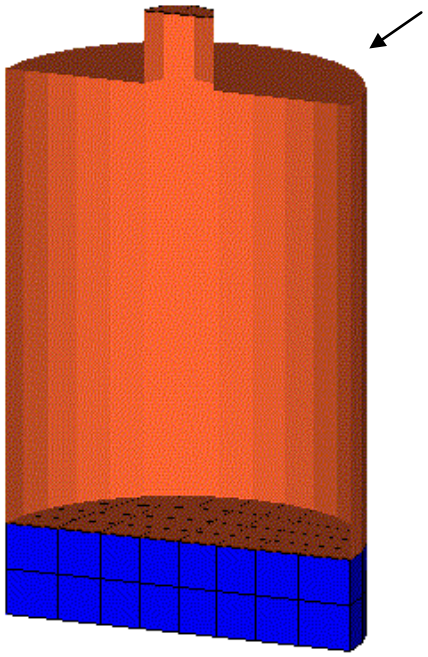


Fig.5.27 FLACS_BC 境界条件の位置（図中メッシュ分割部上部領域）

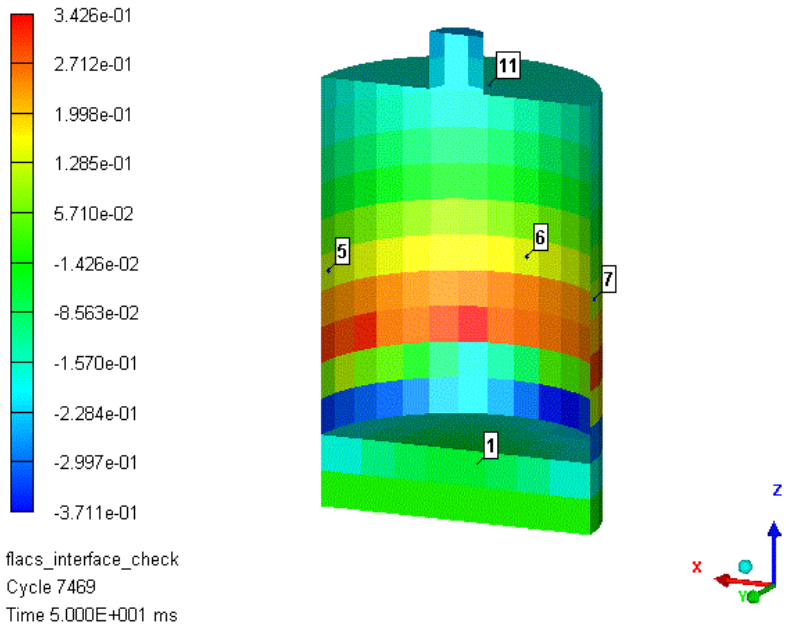


Fig.5.28(a) 時刻 50ms におけるパーツ表面に負荷された
過剰圧コンター図（ユーザ変数 VAR02）

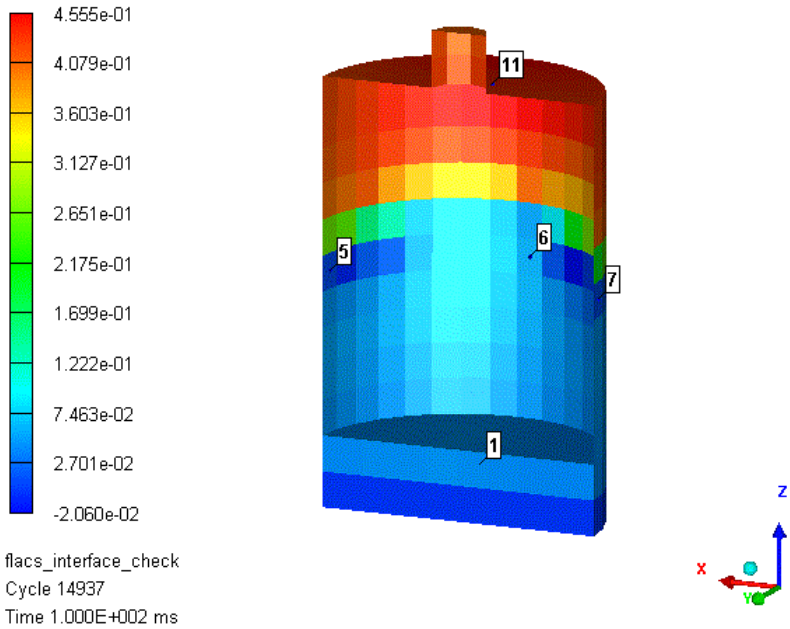


Fig.5.28(b) 時刻 100ms におけるパーツ表面に負荷された
過剰圧コンター図（ユーザ変数 VAR02）

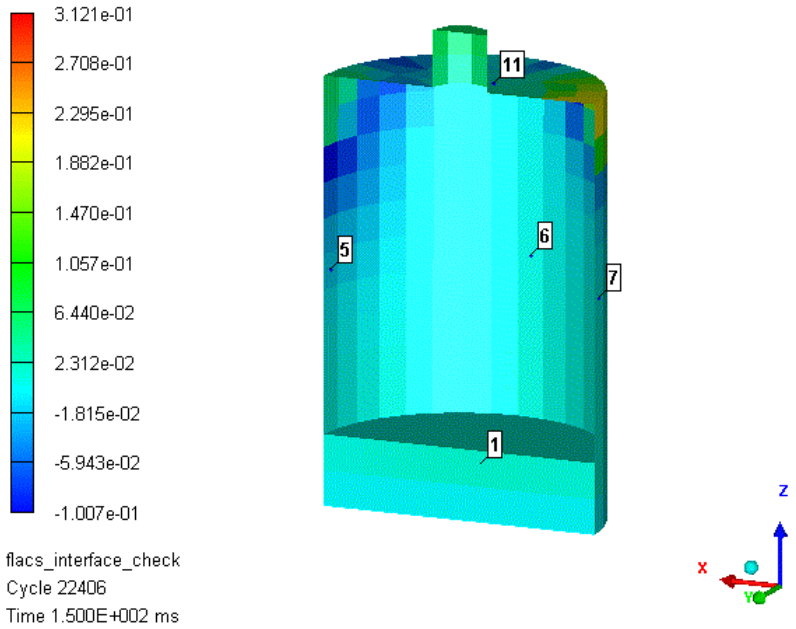


Fig.5.28(c) 時刻 150ms におけるパーツ表面に負荷された
過剰圧コンター図（ユーザ変数 VAR02）

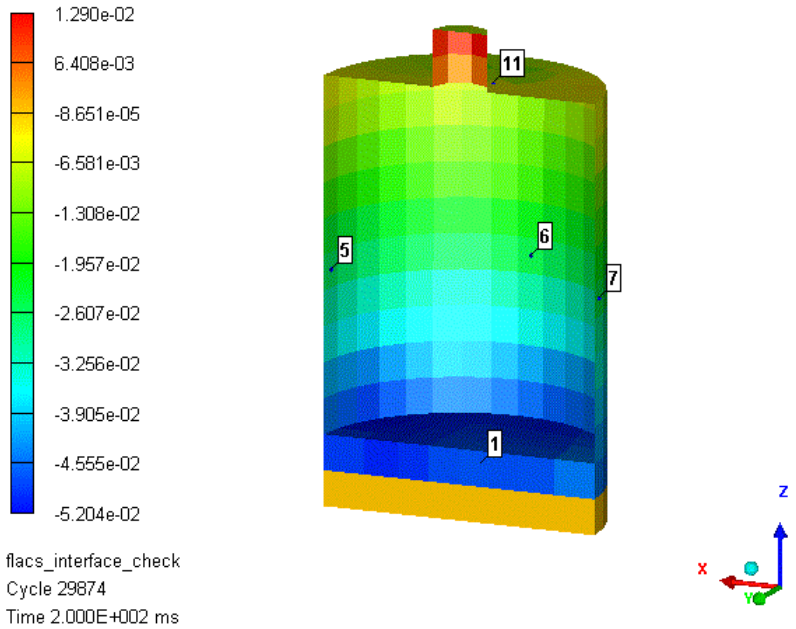


Fig.5.28(d) 時刻 200ms におけるパーツ表面に負荷された
過剰圧コンター図（ユーザ変数 VAR02）

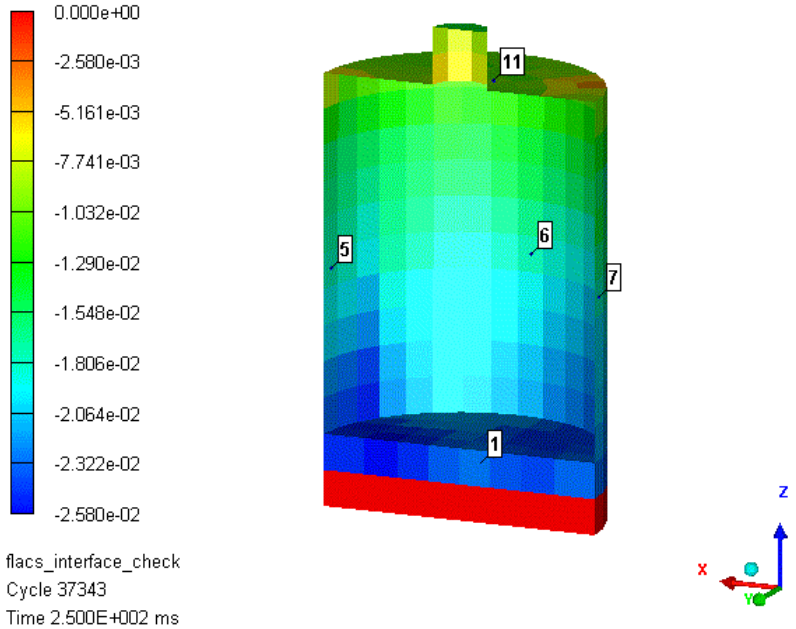


Fig.5.28(e) 時刻 250ms におけるパーツ表面に負荷された
過剰圧コンター図（ユーザ変数 VAR02）

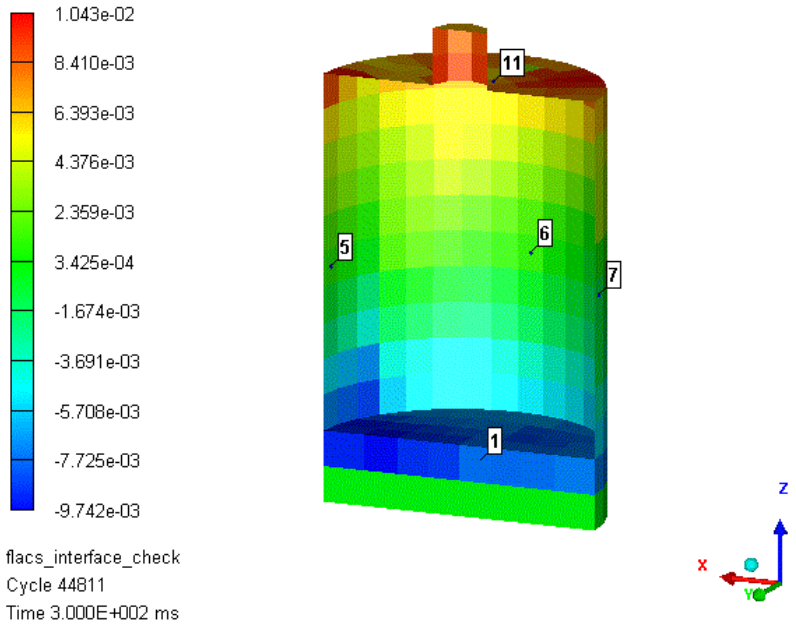


Fig.5.28(f) 時刻 300ms におけるパーツ表面に負荷された
過剰圧コンター図（ユーザ変数 VAR02）

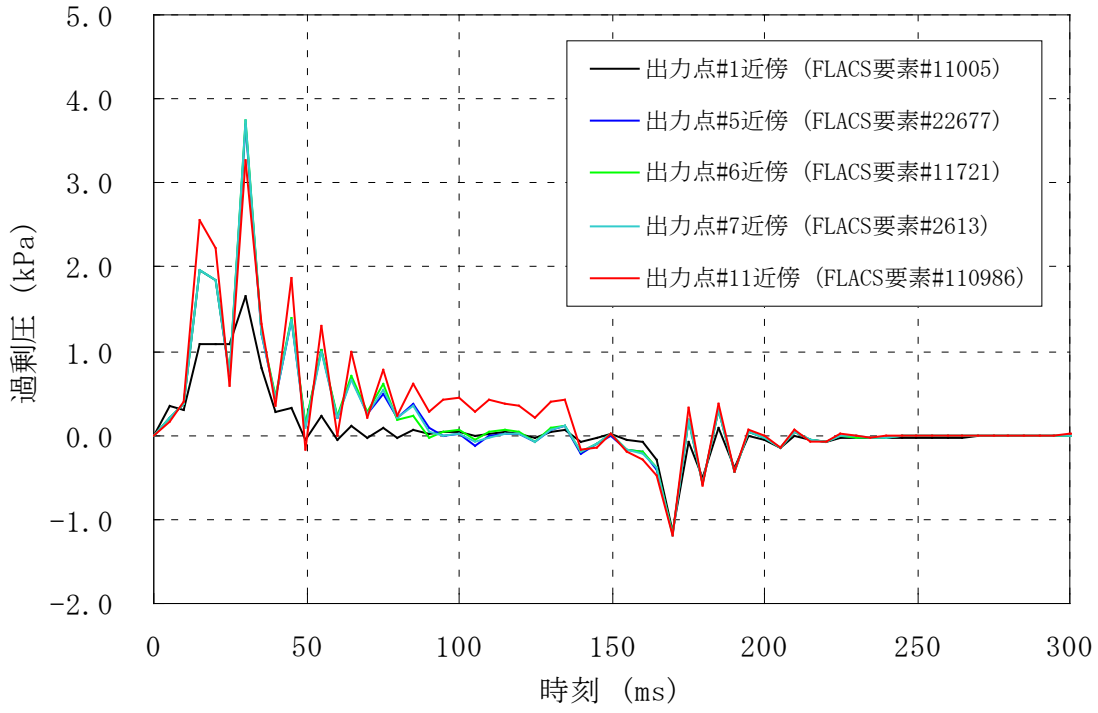


Fig.5.29 Table5.1 に記載した FLACS 要素番号 IC における過剰圧時刻歴

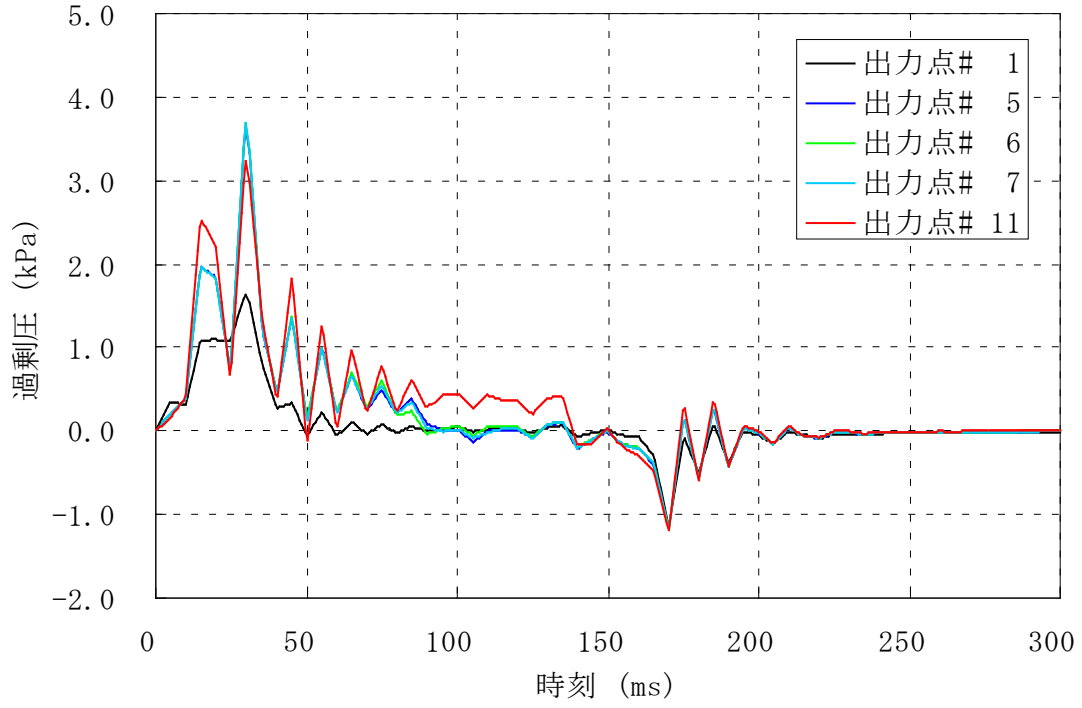


Fig.5.30 AUTODYN 解析結果における各出力点での過剰圧時刻歴

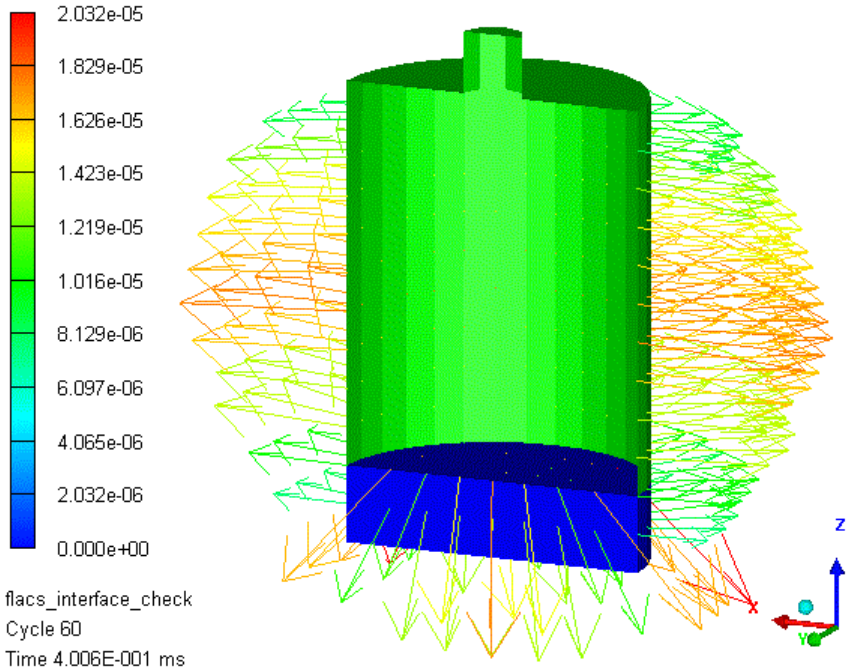


Fig.5.31 計算開始直後の速度ベクトル図

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	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の）　1	1
比透磁率[b]	（数字の）　1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ sA$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（X 線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ sA$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	$1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}\ J$
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}N$
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St\ =1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb\ =1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal\ =1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G\ =1Mx\ cm^{-2}\ =10^{-4}T$
エルステッド[c]	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	$1\ \mu\ =1\mu m=10^{-6}m$

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています