

JAERI-Tech
98-002



高温ガス炉—水素製造システムの技術開発
における火災・爆発解析コードの
開発・整備方法の検討
(受託研究)

1998年1月

中村正志・西原哲夫

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。

入手の問い合わせは、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）で複写による実費頒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, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

高温ガス炉-水素製造システムの技術開発における
火災・爆発解析コードの開発・整備方法の検討
(受託研究)

日本原子力研究所大洗研究所核熱利用研究部

中村 正志・西原 哲夫

(1998年1月5日受理)

高温ガス炉-水素製造システムでは、水素製造プラントの接続に起因し、想定すべき火災・爆発事故に対する原子炉の安全性を確保することが安全上重要な課題の一つである。

著者の一名は蒸気雲爆発に対する安全評価方法(案)を既に提案したが、この提案は既存の評価方法のうち最も保守的な方法を採用しているため、安全裕度の合理化、ひいては安全設計の合理化の観点から、提案した安全評価方法(案)の保守性を定量的に明らかにし、合理的な安全裕度を定めて評価方法を再構築する必要がある。

そこで、高温ガス炉-水素製造システムで想定される火災爆発事象について、事象推移と影響を詳細に解析できるコードシステムを開発することにしたが、これまで漏洩後の液面火災から蒸発-拡散-爆発(爆燃/爆ごう)までのすべての事象を一つのコードで解析できるものがなかったため、具体的開発方針を検討した。

必要な解析機能と多くの市販解析コードの解析機能を調査した結果、適当な汎用熱流動解析コードと爆燃/爆ごう専用コードを組み合わせ、インターフェース等の不足機能を追加することによって、目標とするコードシステムを実現可能と判断した。

具体的には、実績等も考慮の上、汎用熱流動解析コードとしてPhoenicsを、爆燃専用コードとしてAutoReaGasを、爆ごう専用コードとしてAUTODYNを選定した。なお、ソースコードを入手できる汎用熱流動解析コードをベースとした大規模改造により目標とするコードシステムを実現することも検討したが、短期間での目標達成は極めて困難であると判断し、採用しなかった。

本報告書は電源開発促進対策特別措置法に基づき、科学技術庁から委託された研究「核熱利用システム技術開発」の成果である。

大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀3607

Consideration on Development of Fire and Explosion Analysis Code System
for HTGR Hydrogen Production System
(Contract Research)

Masashi NAKAMURA and Tetsuo NISHIHARA

Department of Advanced Nuclear Heat Technology
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received January 5, 1998)

One of the most important safety design issues for a High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR) hydrogen production system is to ensure reactor safety against fire and explosion at the hydrogen production plant. One of the authors has already proposed safety evaluation methods, safety criterias, and countermeasures against fire and explosion.

While the proposed safety evaluation method is based on the most conservative assumptions, it is necessary to make its quantitative degree of conservativeness clear and to re-construct a safety evaluation method with moderately reasonable safety margins, from the view point of rationalization of safety design.

In this report, we considered and mapped out our concrete course to develop a new code system which can analyze event sequences and consequences in detail, on assumed fire and explosion accidents in the HTGR hydrogen production system.

As a result of consideration on analytical functions required for the code system and of review on commercial analysis codes, it is concluded that it can be easily achieved to couple and cooperate three existing codes (one wide-use thermo-hydrodynamic analysis code, one gas explosion / blast simulation code and one high explosive / blast simulation code), with the help of newly developing interfaces between each code. Although as one of choices we considered to develop a new code corresponding to the three codes, on the basis of a wide-use thermo-hydrodynamic analysis code of which we can obtain the source code, it is difficult to develop such a short time period of three years.

We selected Phoenix code as a wide-use thermo-hydrodynamic analysis code, AutoReaGas code as a gas explosion / blast simulation code and AUTODYN code as a

high explosive / blast simulation code, as a result of the consideration and the review.

Keywords: HTGR, Hydrogen Production System, Safety Evaluation, Fire, Explosion, Numerical Calculation Code, Code System, Numerical Simulation,

This is a blank page.

目 次

1. はじめに	1
2. 高温ガス炉-水素製造システムの概要	2
2.1 HTGR-水素製造システムの概要	2
2.2 HTTR-水素製造システムの概要	2
3. 解析対象とする事象	4
3.1 原子炉建家外部における火災爆発	4
3.2 原子炉建家内部における火災爆発	4
4. 検討結果	5
4.1 必要な解析機能	6
4.2 解析コードの選定	13
4.3 選定した解析コードの解析機能	13
4.4 単一コードでの対応可能性	14
4.5 コードシステムとしての対応可能性	14
4.6 コードシステムの比較	15
4.7 コードシステムの選定	15
4.8 開発・整備スケジュール (案)	16
5. まとめ	16
謝 辞	17
参考文献	18
付録-1 既存解析コードの概要	40
付録-2 乱流モデルについて	45
付録-3 必要な必要な開発・整備項目 (機能の追加・修正)	49
付録-4 用語	51

Contents

1. Introduction	1
2. HTGR Hydrogen Production System	2
2.1 HTGR Hydrogen Production System	2
2.2 HTTR Hydrogen Production System	2
3. Phenomena for Evaluation	4
3.1 Ex-building Fire and Explosion	4
3.2 In-building Fire and Explosion	4
4. Results	5
4.1 Required Analysis Functions	6
4.2 Selection of Existing Commercial Analysis Codes	13
4.3 Functions of Selected Commercial Analysis Codes	13
4.4 Availability of only one Analysis Code	14
4.5 Availability of Code Systems	14
4.6 Comparison of Code Systems	15
4.7 Selection of Code System	15
4.8 Schedule Planning of Developing Code System	16
5. Conclusions	16
Acknowledgements	17
References	18
Appendix-1 Outline of Existing Commercial Analysis Codes	40
Appendix-2 Typical Turbulent Flow Models	45
Appendix-3 Necessary Items for Preparing Code System (Function Supplement and Modification)	49
Appendix-4 Technical Terms	51

1. はじめに

高温ガス炉（以下、HTGRと略す）の核熱を利用して水素を製造することは化石燃料の消費量と二酸化炭素の放出量を削減するための有効な手段として期待されており、昭和40年代後半以降多くの研究開発が実施されてきた。

HTGR－水素製造システムでは原子炉に水素製造システムを接続し、多量の可燃性流体を取り扱うが、これによって原子炉安全への脅威が増加することがあってはならず、特に火災爆発対策は安全上最も重要な課題の一つである。

現在、原研では、高温工学試験研究炉（以下、HTTRと略す）に接続する、天然ガス（メタンを主成分とする。以下、LNGと略す）の水蒸気改質による水素製造システムを計画中であり、HTGR水素製造システムへの適用まで視野に入れた火災爆発対策を検討している。これまでに、HTGR水素製造システムにおける火災爆発を原子炉建家内部における火災爆発と原子炉建家外部における火災爆発に大別し、原子炉建家内部での火災爆発に対しては設計基準（以下、DBAと略す）事象としては起こりえないようにするための対策（発生防止策）を提案するとともに、原子炉建家外部における火災爆発に対しては、十分な離隔距離を取ることを先ず優先させることにし、原子炉施設の安全上重要な機器・構造物並びに運転員の安全を確保するために必要な離隔距離を評価する方法を提案した。⁽¹⁾

しかし、これらの簡易評価方法では、既存の簡易評価方法の中で最も保守的な評価方法を採用しているため、かなりの安全裕度が含まれている。試算によると、HTTR水素製造システムでは約1.2km、商業炉規模と考えられる300MW規模のHTGR水素製造システムにおいては数kmの離隔距離の確保が必要との結果が得られている。実用化のためにはこの必要離隔距離を合理的に低減し、できるだけ近接設置する必要があるが、そのためには詳細解析によって簡易評価方法の安全裕度を特定し、合理的な裕度を有する安全評価方法を再構築することが必要である。

一方、原子炉建家内部での火災爆発については、設計基準外（以下、BDBAと略す）事象とすることによって安全評価上は評価不要となるが、最近の軽水炉やFBRの分野においては、BDBA以上の事象についても成立性を見通しを解析によって得ておくことが必要と考えられており、HTGR水素製造システムにおいても同様に、万々一原子炉建家内部での火災爆発が起こっても成立するとの見通しを得るための解析が必要になると予想される。

上記のような背景から、HTGR水素製造システムにおける火災爆発の影響評価を行うためのコード開発を検討してきたが、そこではエンジン内の燃焼解析コードKIVA－3に大規模な改造を加えることを前提としており、我々はその実現性や経済性等を危惧した。そこで、独自に調査を行い、汎用熱流動解析コードと爆燃／爆ごう専用解析コードを組み合わせたコードシステムを提案した。

以下に、その具体的内容を示す。

2. 高温ガス炉－水素製造システムの概要

2.1 HTGR 水素製造システムの概要

2.1.1 2次系を有するシステム

2次系を有するシステムの一例をFig.2.1に示す。多量の可燃物を取り扱う水素製造プラントを原子炉建家外の十分離れた位置に設置し火災爆発の影響を無くすために、このシステムでは原子炉－1次系ヘリウム配管－中間熱交換器－2次系ヘリウム配管の一部までを原子炉建家内に、2次系ヘリウム配管の大部分と水素製造プラントを原子炉建家外に設置する。⁽²⁾ また、2次系ヘリウム配管と水蒸気改質器の耐震クラスをC (S_2) として設計することによって、これら同時破損による原子炉建家内への可燃性ガスの浸入を設計基準事象から排除する計画である。⁽¹⁾

以上により、水素製造プラントの大部分を一般化学プラント並みに設計することができるため、水素製造プラントの経済性には優れるが、反面、2次系ヘリウム配管の設置によるコストアップとここでの熱損失の増大につながる。初期のHTGR水素製造システムでは、おそらくこのタイプが採用されることになると予想される。

2.1.2 2次系削除システム

2次系削除システムの一例をFig.2.2に示す。このシステムでは、原子炉－1次系ヘリウム配管－水蒸気改質器－蒸気発生器－原料供給配管、生成ガス配管、給水配管の一部までを原子炉建家内に設置する。⁽³⁾ このシステムは究極のHTGR水素製造システムと考えられ、2次系削除による経済効果は大きいですが、多量の可燃性ガスを原子炉建家内に導入するため、解決すべき課題が多く、社会的な受容性の観点からも超えるべきハードルが多い。

2.2 HTTR 水素製造システムの概要

HTTR水素製造システムではHTTRの核熱を利用してLNGを水蒸気改質し、水素を製造する。HTTR水素製造システムでは、水素製造プラントを原子炉建家外の十分離れた位置に設置することによって、水素製造プラントの大部分を一般化学プラント並みに設計することを第一目標とし、2次系を有するシステムが採用されており、その概要は以下の通りである。^{(1)、(2)}

2.2.1 全体構成

HTTR原子炉本体、水素製造プラント及びHTTR原子炉本体の中間熱交換器と水素製造プラントを接続する高温二重配管の概略系統構成について、7年度までに原研が行った設計成果に基づく鳥瞰図及びフローチャートを模式的に各々Fig.2.3、Fig.2.4に示す。また、HTTR原子炉本体の

系統配置を Fig.2.5 に示す。また、プラント設置場所を Fig.2.6 に、配置を Fig.2.7 に示す。

2.2.2 HTTR 原子炉本体

HTTR は定格原子炉熱出力が 30MW であり、この熱で原子炉冷却材（1 次ヘリウム）は、高温試験運転と称する運転モードにおいて、原子炉出口で 950℃ に昇温される。水素製造プラントは、HTTR 原子炉施設の運転モードとして、並列運転・高温試験運転のとき運転する。並列運転時には、原子炉からの原子炉冷却材は、二重管の内管内を通り、途中の分岐で流量比約 2:1 で分配され、約 2/3 が 1 次加圧水冷却器に、残り約 1/3 が中間熱交換器に導かれる。両熱交換器で冷却された原子炉冷却材は、ガス循環機で昇圧された後、両熱交換器の二重管の内・外胴環状部を通り、さらに、二重管の環状部を経て分岐部で再び合流し、定格出力時には 395℃ で原子炉に戻る。この結果、中間熱交換器では、定格出力時に約 10MW の熱が原子炉冷却材から 2 次側のヘリウムガスに伝達される。この 2 次ヘリウムは、中間熱交換器出口で、定格出力時にノミナル 905℃ まで昇温することが許されている（中間熱交換器伝熱管の最高使用温度が 955℃ であるため）。

並列運転・高温試験運転時における原子炉の定格出力時主要条件、並びに、中間熱交換器の 2 次ヘリウム条件（出口温度 905℃ の場合）を Table 2.1 に示す。

2.2.3 水素製造プラント

水素製造プラントは、Fig.2.3、Fig.2.4 に示したように、2 次ヘリウム冷却系において、水蒸気改質器を起点としてヘリウム冷却器に接続する単管と高温二重配管との接続部まで、並びに、この範囲内の 2 次ヘリウム系機器の 2 次側及びその下流の設備（LNG 供給タンクを含める）の総称であり、給水系、原料供給系、改質ガス系等を含む。水蒸気改質器入口での 2 次ヘリウムは、高温二重配管を通る間に放熱あるいは高温/低温 2 次ヘリウム間熱交換による熱損失により、中間熱交換器出口 2 次ヘリウム温度より降温し、中間熱交換器出口温度が 905℃ の場合に対して、保守的に、即ち、断熱材の劣化等を過大に見積り、880℃ としている。

水素製造プラントでは、2 次系ヘリウム配管と水蒸気改質器の耐震クラスを C (S2) として設計することによって、これらの同時破損による原子炉建家内への可燃性ガスの浸入を設計基準事象から排除する計画である。

一方、原子炉建家外の火災爆発に対しては水素製造プラントを原子炉建家から十分離れた位置に設置することによって一般化学プラント並の安全レベルで設計することを第一目標としているが、十分な離隔距離を取ることが実際上困難なことが予想される。この場合には、LNG を大量に貯蔵する供給タンクを常圧地下式とすることによってファイアボールの発生を防止するとともに、吸引ダクト、防爆型吸引ファン及びフレアスタックを備えたフードをタンク上部に設けることによって蒸気雲爆発の発生を防止する計画である。

なお、製造した水素を含む生成ガスも同様に別途設置するフレアスタックにて焼却処分する計画である。

3. 解析対象とする事象

開発・整備する解析コードでは、下記の事象を解析対象とする。

3.1 原子炉建家外部における火災爆発

原子炉建家外部で発生する可能性のある火災爆発は以下に示す3つの事象である。

- ・ 蒸気雲爆発
- ・ ファイヤーボール
- ・ 液面火災

これらのうち、特に影響が大きい事象は蒸気雲爆発とファイヤーボールである。しかし、ファイヤーボールに関しては、既存の化学プラント等で取られている地下埋設常圧貯蔵式 LNG タンクの採用によって発生の可能性をbdba 事象から更に低く抑えることができる。⁽¹⁾

一方、液面火災に関しては直接的影響は小さいと考えられるものの、大規模な火災が長時間継続して発生した場合には、大規模開放空間での循環流が形成され、従来の被曝評価結果が変化することが懸念される。

以上より、原子炉建家外部の開放空間における火災爆発に関しては、次の2つを解析対象とする。(Fig.3.1 と Fig.3.2 参照)

- ・ 蒸気雲爆発における事象推移：

蒸気雲の発生 (LNG 漏洩→蒸発)	→ 拡散→爆発→圧力波伝播	⇒爆風圧
	↘放射による熱拡散	⇒受熱
- ・ 液面火災における事象推移：

LNGの漏洩→火災→放射による熱拡散と大気流動の変化	⇒被曝評価への影響
----------------------------	-----------

3.2 原子炉建家内部における火災爆発

改質器と2次ヘリウム配管については、その重要度分類をPS-3とし、設計・建設・運転を通して高い信頼性を維持するとともに、耐震設計においても、耐震クラスAsもしくはC (S2) に分類し、設計用限界地震 (S2地震) を想定しても機器が損傷しないように設計する予定である。⁽¹⁾

しかし、最近では、bdba 事象は勿論のことシビアアクシデントが万々発生しても、公衆被ばくに至らないという見通しを得ておくことが必要とされており、例えばFBR実証炉におけるナトリウム漏洩火災に関しては、DBA 事象として1/4Dt規模の漏洩孔からの漏洩火災<ここで、D

- ④単一コードでの対応可能性検討
- ⑤コードシステムとしての対応可能性検討
- ⑥コードシステムの比較検討
- ⑥コードシステムの選定
- ⑧開発スケジュール（案）の設定

4.1 必要な解析機能

上述の各事象の推移を解析するためには、蒸発、ガス拡散、燃焼（液面火災、蒸気雲爆発、爆ごう）、衝撃波を含む圧力波の伝播、大気熱流動の各現象を解析する必要がある。

しかし、液面火災と大気熱流動、蒸気雲爆発と圧力波の伝播、爆ごうと衝撃波の伝播は密接に関係しており、同時に解析することになると考えられるので、それぞれ液面火災、蒸気雲爆発、爆ごうの項でまとめて検討した。また、液面火災／蒸気雲爆発と爆ごうは燃焼メカニズムが全く異なるため、液面火災と蒸気雲爆発を燃焼解析の項にまとめ、爆ごうを個別に項立てて検討した。

4.1.1 蒸発解析に必要な機能

(1) 蒸発に関わる問題

LNGの漏えい～蒸発ガスの拡散を考える場合の最も簡単なモデルは、全漏洩LNGが瞬時にプールを形成し、日射による平均受熱量に応じた蒸発が起こるとするモデルであり、この場合には簡易計算した蒸発量を可燃性ガスの拡散解析に入力条件として渡すことになる。

しかし、実際の現象を考えると、漏洩初期には、日射以外にコンクリートや地面からも熱を吸収するため上記の平均蒸発量よりはるかに多量の可燃性ガスを発生し、やがて地面の凍結と共に平均蒸発量に漸近していくことが予想される。そのため、実際には蒸気雲のフロントに多量の可燃性ガスが存在することになり、フロントで着火すれば、平均蒸発量で考えた場合より大きな被害をもたらすことが考えられる。

そこで、瞬時プールモデルのもたらす非保守性を避けるためには、より現実に則した蒸発モデルの採用を考える必要がある。(4)、(5)

(2) 蒸発解析に必要な機能

以上の蒸発に関わる問題に対応して、コードは以下の機能を持つ必要がある。(4)、(5)

- ①漏洩開始～漏洩終了～蒸発終了までのプール液位の計算
- ②地面とプールとの熱伝達係数については地面の凍結を考慮する。
- ③液位と地面とプールとの熱伝達係数の変化を考慮した地面及び雰囲気からプールへの伝熱量と日射による受熱量を考慮した蒸発量変化の計算

4.1.2 ガス拡散の解析に必要な機能

(1) ガスの拡散の分類

ガスの拡散現象の分類を Table 4.1 に示す。表中には①分子拡散、②乱流拡散及び③大気安定性に依存した乱流拡散を示している。②と③は共に乱流による渦拡散に伴ったガスの拡散であるが、乱流生成の原因で分けている。

①の分子拡散は②と③の乱流拡散よりも小さい。大気中の乱流拡散に影響を与える大気安定性を表す1つの指標に、地上からの高さに対する温度変化がある。乾燥空気塊を断熱的に上下移動する場合に生じる理想的な温度勾配は次式に示すように一定で、乾燥断熱減率 ($\gamma_d \sim 0.098^\circ\text{C}/\text{m}$) とよぶ。ただし、 T は温度、 z は高度、 C_p は定圧比熱、 g は重力加速度である。実際の高度に対する温度勾配を γ とすると、 $\gamma > \gamma_d$ では安定、 $\gamma < \gamma_d$ では不安定、 $\gamma = \gamma_d$ では中立の状態である。^{(5)、(6)}

$$\left(\frac{dT}{dz}\right) = -\gamma_d = -\frac{g}{c_p} (\approx 0.098) \quad : \text{乾燥空気の理想的な場合の温度勾配 (乾燥断熱減率)} \quad \dots (5.1)$$

$$\left(\frac{dT}{dz}\right) = -\gamma \quad : \text{実際の温度勾配 (}^\circ\text{C}/\text{m}) \quad \dots (5.2)$$

例えば、日中に日射量が大きい場合では、地表近傍の空気が暖められて対流が生じやすくなり、 $\gamma < \gamma_d$ の不安定な状態となる。大気安定性の違いによる煙突からの煙の拡散の様子を Fig.4.1 に示す。

(2) ガス拡散挙動解析に必要な機能

可燃性ガスの大気拡散の概要を Fig.4.2 に示す、可燃性ガスの放出部近傍では、放出流で生じる乱流によりガスが拡散する。放出部から遠ざかるほど大気安定性に依存した乱流拡散の影響が強くなる。なお、大気中の拡散は当然のことながら、風による移流や建築物周囲の流れにも影響される。

以上の事を考慮して、解析する必要がある現象と、その現象を解析するための方法及び解析コードに必要な機能を Table 4.2 にまとめる。コードに必要な機能は表に示したように、①k- ϵ 乱流モデルを有し乱流拡散が評価でき、周囲の施設や建築物の影響が考慮できる事、また②大気安定性に依存した乱流拡散が考慮できる事である。また、大空間の解析では、高度により圧力及び密度が異なるため、③高度に依存した圧力及び密度の初期条件と境界条件を考慮できる機能が必要である。^{(5)、(6)}

4.1.3 燃焼解析に必要な機能

(1) 蒸気雲爆発の解析に必要な機能

①蒸気雲爆発解析に関わる問題

蒸気雲爆発は、雰囲気中に放出され空気と混合されたガスの塊のある場所で着火し、急激に火炎が伝播し、圧力波を発生する現象である。従って、燃焼メカニズムは予混合燃焼であり、爆燃とも呼ばれている。^{(7) ~ (9)}

現在最もよく研究されている予混合燃焼はエンジン内部での燃焼であるが、蒸気雲爆発は開放された大規模空間における非定常予混合燃焼であるため、以下のような問題があり、これを解決するための機能が要求される。

最初の問題は②反応モデルに関するものであり、次に⑥火炎厚みが解析しようとする領域のスケールに対し非常に小さいという問題がある。更に、燃焼が激しくなると火炎背後の膨張流が圧力波を形成させるので、③非圧縮性を示す流れから圧縮性を示す流れに移行するという問題がある。最後に、④燃焼による影響として構造物の受ける圧力と熱があり、後者については燃焼ガスからの放射が支配的であり、これを評価する必要があるという問題がある。なお、前者に関しては、圧縮性流れを解析できる計算スキームであれば圧力波の伝播や、構造物（圧力波により変形しないと仮定）による反射圧力波なども計算することができる。構造物の受ける圧力は、構造物に接する反射圧力波背後の圧力と等しいとして解析する事ができる。これらの問題を以下に示す。^{(7) ~ (11)}

(a)反応モデルに関する問題

②反応の簡略化に対する問題

最も簡単な化学反応である酸素-水素反応でさえ、約30程度の重要な素反応がある。工学的な解析では、これらの素反応を考慮する事は計算コストの観点から得策でなく、総括反応として、逆反応のない1つの反応として総括反応モデルを用いる場合が多い。しかし、この総括反応モデルを用いると、燃焼速度を正確に模擬できない事があり、まず1次元の解析で層流燃焼速度の計算を行い、試験でわかっている燃焼速度と比較して、総括反応モデルで使用されているパラメータが適切であるかどうかチェックする必要がある。^{(7) ~ (11)}

⑥化学反応速度と乱流反応モデル

化学反応速度は一般にアレニウス型反応モデルで表され、化学反応速度は反応するガスの濃度と温度に依存する。しかし、乱流が強くなると反応速度は乱流渦の消散速度に依存するようになる。反応速度が渦崩壊速度に依存する事をモデル化したのが渦崩壊モデルである。したがって、乱流強度の小さなところではアレニウス型反応モデルで計算し、大きなところでは渦崩壊モデルで計算する必要がある。なお、爆ごう波では、反応は衝撃波背後の温度で自発的に反応するため、

乱流反応モデルは必要で無くなる。(7) ~ (11)

(b)解析メッシュの問題

Fig.4.3に層流火炎内の構造の概念(火炎伝播の熱理論の概念を示している)を示す。火炎内の反応帯から予熱帯に熱伝導し、未燃ガスが反応温度 T_i に達して反応を開始する。つまり、火炎内を数メッシュに分割して、火炎内の熱伝導を解く事が火炎伝播を解析する上で必要になる。しかしながら、大規模空間内を解析する場合には、数10 cm以上のメッシュサイズが現状の計算機の能力の制限から必要であり、0.1mm以下のメッシュサイズを用いる事は不可能である。この問題を解決する方法の1つに、火炎の厚みを人工的に拡大して、メッシュサイズの燃焼速度への影響を補正する β 変換法がある。層流及び乱流火炎の厚み、メッシュサイズ及び人工的に拡大された計算上の火炎の厚さの関係をFig.4.4に示す。(7) ~ (11)

なお、爆ごうの場合は反応が衝撃波背後の高温度で自発的に行われ、反応は熱拡散と無関係に進行するので、このメッシュサイズの影響は考慮しなくて良い。

(c)計算スキームに関する問題

火炎伝播が緩やか場合は、火炎背後の膨張流の速度は小さく火炎前方の気相を圧縮する事はしないが、火炎伝播速度が音速に近づくと、火炎前方の気相を圧縮して圧力波を形成させるようになる。この事は流速が音速に対し無視できる非圧縮性の流れから無視できない圧縮性を有する流れまで連続的に解ける計算スキームを有する必要がある。非圧縮性流れスキームでは、MAC, SMAC, HSMAC法などが、圧縮性流れに対するスキームでは、MacCormack, Beam-Warming法などが有名である。非圧縮性流れから圧縮性流れまで解析するスキームとしてはICE法およびSIMPLE法及びそれらに類似した計算スキームが良く知られており、計算スキームについても考慮する必要がある。(10) ~ (14)

(d)燃焼ガスからの熱放射に関する問題

ファイアーボールが形成された場合、強い熱放射が生じ、人体に火傷を負わず危険性がある。汎用流体コードでガスのエネルギー保存式の中に熱放射及び吸収の項を入れて流れ場と熱放射場を連成して厳密に解いているコードはない。その理由は、燃焼ガスからの熱放射を厳密に解くのはガスが1次元の灰色体であっても解くことは困難であり、計算コストが得られる熱放射の信頼性に対して見合わないためであると推測する。したがって、現実的な熱放射の解析を行う場合、燃焼過程の計算が終了したあとで、①燃焼ガスは熱放射により冷却されない(保守的仮定であるが、スケールの大きな燃焼ガス体には有効な仮定である)、②燃焼ガスと受光面の間のガスは透明である(保守的仮定)の仮定のもとで、燃焼ガスの放射率と燃焼ガス温度、及び燃焼ガス体と受光面の位置関係から、受光面の放射伝熱を求めれば良いと考える。

②蒸気雲爆発解析に必要な機能

以上の燃焼解析に関する問題に対応して、燃焼解析に対しコードが持つべき機能は以下のよう

になる。なお、これらの機能は Table 4.2 にまとめた。

(a)アレニウス型反応モデルと渦崩壊モデルを乱流強度によって使い分ける機能

考慮できる反応数は、複数の素反応を考慮できるものが良いが、最低限、1個の総括反応モデルが使用でき、当然の事ながら、酸素、窒素、燃料、反応生成物等の化学種保存式を有する必要がある。

(b)火炎伝播に対する解析メッシュサイズの影響補正を行う機能

この機能は小スケールの燃焼解析に対して必要ない場合があるが、屋内や屋外の中・大スケール内の燃焼解析には必須な機能である。

(c)非圧縮性流れから圧縮性流れまで解析できる計算スキームを有する事

燃焼の激しさに依存して、非圧縮性を有する流れから圧縮性を有する流れと変化するので必要な機能である。圧縮性の計算スキームで非圧縮性を有する流れに適用することもできるが計算効率が悪い。

(d)燃焼あるいは爆発過程の計算終了後に、その結果を入力として受光面が受ける放射伝熱量が計算できる機能。

(2) 液面火災解析に必要な機能

①液面火災解析に関わる問題

(a)燃焼に関する問題

液面火災は、火炎からの液体燃料表面への放射と対流による熱伝達によって液体燃料が蒸発し、雰囲気へ拡散した可燃性ガスと、雰囲気から低酸素濃度領域へ拡散してくる酸素とが、条件に応じて反応（燃焼）する現象であり、燃焼メカニズムは拡散燃焼である。^{(7)~(9)}

従って、燃焼生成物を含む各化学成分の拡散、火炎からの熱による液面からの可燃性ガスの蒸発、火炎-液面/火炎-雰囲気間の熱伝達、着火-消炎を取り扱えることが必要である。また、反応モデル、解析メッシュ、計算スキーム、熱放射に関して、蒸気雲爆発と同様な問題がある。^{(7)~(19)}

なお、液面火災においても β 変換法等の採用が望ましいが、蒸気雲爆発のような非常に薄い火炎の急激な伝播が生じることはなく、また火炎の存在する領域が蒸気雲爆発の場合より狭く、予測が可能であるため、予め細かなメッシュを設定しておくことで十分対処可能と考えられる。

(b)大気流動等に関する問題

液面火災の解析目的は、燃焼による上昇気流の発生及び燃焼領域への大気の吹き込み等の大気

の熱流動を解析し、被曝評価の入力条件を求めることである。従って、大気流動解析においては、火災解析よりはるかに大きな開放空間を解析対象とすることになり、2つの解析を同時に同一モデル上で実行することはメッシュサイズの点で困難であり、個別に行うべきと考える。但し、個別に実行するため、両解析のインターフェース機能が必要になる。

②液面火災解析に必要な機能

以上の燃焼解析に関する問題に対応して、燃焼解析に対しコードが持つべき機能は以下のようになる。

- (a)各化学成分の拡散を取り扱えること
- (b)火炎-液面/火炎-雰囲気間の熱伝達を取り扱えること
- (c)火炎からの熱による液面からの可燃性ガスの蒸発を取り扱えること
- (d)火炎-液面/火炎-雰囲気間の熱伝達を取り扱えること
- (e)着火-消炎を取り扱えること
- (f)アレニウス型反応モデルと渦崩壊モデルを乱流強度によって使い分ける機能
- (g)非圧縮性流れから圧縮性流れまで解析できる計算スキームを有する事
- (h)燃焼解析と大気流動解析のインターフェース機能
- (i)燃焼あるいは爆発過程の計算終了後に、その結果を入力として受光面が受ける放射伝熱量が計算できる機能

4.1.4 爆ごう解析に必要な機能

(1) 爆ごう解析に関わる問題

爆ごうの特徴として、①火炎伝播速度が超音速で（例えば空気中のメタンでは約1798m/s）、②発生圧力が極めて大きく（空気中のメタンでは17.1atm）、③衝撃波を発生し、④発生温度が非常に高い（空気中のメタンでは2775K）等が挙げられる。^{(7)~(9)}

従って、爆ごう解析においては、燃焼現象、衝撃波を伴う現象、及び流体と構造物の衝撃的相互作用など固体と気体の動的相互作用挙動を同時に扱えることが必要になる。

(2) 爆ごう解析に必要な機能^{(10)、(20)~(30)}

①爆発解析機能

現実の非均質な混合気体が複雑な形状の中で反応する現象は極めて複雑な過程を経るものと考えられ、正攻法に従えば、反応速度を表す多数の連立常微分式（最も簡単な水素と酸素の混合気体を考えた場合でも、20種類以上の反応式を考慮しなければならず、これらの個々の式に対して、アレニウスの反応速度式を適用すると20個以上の連立常微分式を解かねばならなくなる。）と流体の挙動を記述する2階の偏微分方程式とを連立させ、乱流効果等を考慮しながら全方程式

系を解くことが必要になり、膨大な計算時間を要することが容易に予想される。

しかし、安全評価の観点からは、想定される最も重大な事故が起こった場合をチェックすれば良く、予め一様に混合された気体がアприオリに定常的な理想爆ごうを起こすという保守的な仮定を置けば良い。この場合、一様な速度で反応波面が進行し、エネルギーを開放して行くが、火炎の伝播速度（爆ごう速度）は理論値と極めて良く一致する。（通常の誤差は2～3%以内）

従って、定常的な理想爆ごうの仮定を置けば、爆ごう波がいつ／どこを通過し、反応が生じるかが分かり、更に、爆ごう物質の開放する化学エネルギー量及び圧力評価式が分かれば、これらを連続流体力学コードに入力することによって、そのエネルギー開放過程（爆ごう現象）を解析することができる。

以上より、爆ごう物質の爆ごうパラメータ<㉑初期密度、㉒初期の比内部エネルギー（単位質量当りの化学エネルギー）、㉓爆ごう速度、㉔状態方程式>を求める計算機能が必要である。

②陽解法の採用

圧力波の伝播が変形挙動に支配的な影響を持つため、急激な現象の解析に適した陽解法の採用が必要である。

③衝撃波前後における不連続な物理量の適切な表現方法

衝撃波を伴う現象においては、衝撃波前後で物理量が不連続になるため、有限な差分メッシュで表現することが困難になる。従って、この問題を解消するため、例えば、J. von Neuman の疑似粘性を用いる手法等の採用が必要になる。

④Lagrange-Euler coupling

1つの問題の中で、固体のモデル化に適したLagrangeの方法と流体のモデル化に適用性を持つEulerの方法を同時に使うことができ、しかもその相互作用を扱えること。

⑤Lagrangian rezoning 機能

Lagrangeの方法の場合、Lagrange座標系同士での相互作用を計算する必要があり、複雑な変形が予想されるため、計算途中でのメッシュ切り替えが必要になる。そのため、対話型のLagrangian rezoning 機能が必要になる。

⑥シェル計算機能

爆ごうと容器の相互作用を取り扱うため、薄板構造物の変形を取り扱うシェル計算機能が必要である。

4.1.5 まとめ

解析対象とする事象毎に、必要な解析機能の検討結果のまとめを Table 4.3 に示す。

4.2 解析コードの選定

本検討で対象とする事象は熱流動と化学反応が併行して起こる現象であり、通常の家屋やビル火災については専用コードが開発されているが⁽³¹⁾、本検討で対象としている液面火災等については汎用熱流動解析コードに機能を追加して解析したケースが多い。^{(15) ~ (19), (32) ~ (35)} そこで、まず、国内で使用実績の多い5つの汎用熱流動解析コードを選定した。^{(36) ~ (38)} 一方、爆燃/爆ごうは特殊な分野であり、解析に際して通常とは異なる処理を行うため、開発例が少なく、公開されているコードも少なかった。^{(10), (22) ~ (30)} ここでは、文献等で情報を得ることができた下記の6つのコードを選定した。以上により、先ず、主要なコードとして11コードを選定した。

- ①汎用熱流動解析コード : ① Phoenix コード^{(32), (36) ~ (38)}
 - ② α -Flow コード^{(33) ~ (38)}
 - ③ FIDAP コード^{(33) ~ (38)}
 - ④ STREAM コード^{(33) ~ (38)}
 - ⑤ FLUENT コード^{(33) ~ (38)}
- ③爆燃解析コード : ① AutoReaGas コード⁽¹⁰⁾
 - ② TM5-855 コード⁽¹⁰⁾
 - ③ BLAPAN コード⁽¹⁰⁾
 - ④ SPLIT-X コード⁽¹⁰⁾
- ④爆ごう解析コード : ① AUTODYN コード^{(22) ~ (30)}
 - ② PISCES-2DELK コード^{(22) ~ (30)}

更に、軽水炉等のシビアアクシデントにおける炉外事象（水素燃焼）の解析によく用いられる下記2コードを 参考用の爆燃解析コードとして追加・調査した。^{(39) ~ (41)}

- ⑤格納施設内燃焼解析コード : ① MAPHY-BURN コード⁽⁴¹⁾
 - ② CONTAIN コード^{(39), (40)}

4.3 選定した解析コードの解析機能

Table 4.3に示す解析対象とする事象と必要な解析機能を、国内主要ソフトメーカーに提示し、ヒアリングするとともに、入手可能な文献とマニュアルを参考に、上記13コードを調査した結果を Table 4.4 ~ 6 に示す。（詳細は付録-1 参照）

なお、調査の結果、①、③、④、⑤の汎用熱流動解析コードはいずれもほぼ同じ基礎方程式と解析手法を採用しており、機能的に大差ないことが分かった。そこで、Table 4.4では、最も広く利用され実績も多いPhoenixs コードを代表として表記した。

一方、 α -Flow コードに関しては、高速圧縮性流体の解析機能が比較的充実しており、唯一国内で開発され市販コードであり、ソースを入手可能なため、上記4コードとは別に表記した。

また、爆燃と爆ごうに関しては、以下の通りであり、目的に適した市販コードは、AutoReaGas コードとAUTODYN コード以外にないことが分かった。

- ①MAPHY-BURNコードとCONTAINコードでは燃焼ガスが限定されており、メタンガス等の燃焼を取り扱うためには新たな試験が必要になる。また、圧力波が発生する場合の解析ができない。更に、構造物等の変形挙動等を解析するためには構造解析コードを併用する必要があるが、連成解析は不可能である。従って、これらは今回の目的には適さない。
- ②TM5-855コードとBLAPANコードでは、種々の仮定を設けているため、ピーク圧が過大になったり、負圧の発生を模擬できない等の問題点がある。また、構造物等の変形挙動を解析するためには構造解析コードを併用する必要があるが、連成解析は不可能である。一方、SPLIT-Xコードは弾道威力の解析という極めて特殊な目的のために開発されものである。従って、これらは今回の目的には適さない。
- ③PISCES-2DELK コードは既に販売が中止になっており、利用不可能である。

4.4 単一コードでの対応可能性

Table 4.4～6の調査結果から、現状のままでは、いずれのコードも単独で解析機能目標を達成することができないことが分かった。

4.5 コードシステムとしての対応可能性

現状では単一の既存解析コードで解析機能目標を達成できないため、次に代案として、ソースを入手可能な解析コードの改造(大幅な機能追加)によってコードシステムを整備する方法と、複数の解析コードの組み合わせによる補完と一部機能追加によってコードシステムを整備する方法を考えた。

既存解析コードの調査結果から、ソースを入手可能なコードは α -Flowコードだけであるため、前者としては α -Flowコードの改造を考えた。但し、この場合、爆燃、爆ごうにおける流体の挙動と構造物の変形挙動との連成解析を行うためには更に大規模な機能整備が必要となるため、必要に応じて汎用構造解析コードを併用はするものの、連成解析を行わないものとした。

一方、後者としては汎用熱流動解析コードとAutoReaGasコード及びAUTODYNコードの組

み合わせを考えた。Table 4.4～6の調査結果から、後者における汎用熱流動解析コードとして α -Flowコードを含めた何れのコードを採用しても機能的には大差ないものと予想され、ここでは上記と同じ理由から Phoenixs コードを代表として取り上げた。

4.6 コードシステムの比較

現状の解析機能と必要な開発・整備項目に関する検討結果は以下の通りであり (Table 4.7及び付録-2参照)、Phoenixs コードと AutoReaGas コード、AUTODYN コードを組み合わせることが、最も現実的と判断した。

- ① α -Flow コード改造については、爆燃と爆ごうに関して大幅な改造が必要であり、開発課題が多く、時間的な制約とコストを考慮すると実現が困難と予想される。なお、 α -Flow コード改造以外に、安価でソースを入手可能な KIVA3 コードの改造も考えられるが、その場合、開発課題が更に多く、ほぼ全面的な改造が必要になるため、期間内での実現が非常に困難と予想される。
- ② Phoenixs コードと AutoReaGas コード及び AUTODYN コードを組み合わせについては、コード間の機能補完と一部機能追加によって解析機能目標を比較的容易に達成することができる見通しが得られた。但し、この場合には複数の異種コードを組み合わせることになるため、コード間のインターフェースの整備が必要になる。なお、Phoenixs コードの代わりに α -Flow コードを含めた他の汎用熱流動解析コードを採用しても同様に解析機能目標の達成は可能と考えられる。

4.7 コードの選択

上記の検討では、汎用熱流動解析コードの代表として Phoenixs コードを取り上げたが、FIDAP コード、STREAM コード、FLUENT コード及び α -Flow コードの何れも、Phoenixs コードと機能的に大きな差異はなく、従ってこれらのいずれと AutoReaGas コード、AUTODYN コードを組み合わせても解析機能目標を達成できる見通しである。

しかし、解析ケースによっては、汎用熱流動解析コード→爆燃専用解析コード→爆ごう専用解析コード→汎用熱流動解析コード等という連携が必要になることもあり、複数のソフトメーカーにまたがるとコード間のインターフェースの整備が極めて煩雑になる可能性があり、望ましくない。

* 汎用熱流動解析コードについては、株式会社 CRC 総合研究所が Phoenixs のコード、株式会社富士総合研究所が α -Flow コードの、株式会社計算力学研究センターが FIDAP コードの、株式会社流体コンサルタントが FLUENT コードの、株式会社ソフトウェアクレードルが STREAM コードの国内販売権を所有している。また、AutoReaGas コードと AUTODYN コードに関しては、株式会社 CRC 総合研究所が国内販売権を所有している。

以上より、今後はPhoenixsコードとAutoReaGasコード、AUTODYNコードを組み合わせることによって、解析コードの開発・整備を実施したいと考える。

4.8 開発・整備スケジュール (案)

平成12年度からHTTR-水蒸気改質水素製造システムの詳細設計を開始する予定であり、これに合わせ、平成9年度に原子炉建家外部の開放空間における火災爆発に関する開発・整備を、平成10年度に原子炉建家内部の密閉空間における火災爆発に関する開発・整備を行い、平成11年度に簡易評価方法の安全裕度を特定するためのパラメータ解析を実施する計画を立案した。(Table 4.8 参照)

5. まとめ

原子炉建家外における蒸気雲爆発、大規模液面火災及び原子炉建家内における爆ごうについて、事象推移と影響を詳細に解析できるコードシステムを、3年の期間で、開発・整備する方法を検討した。

コードシステムに必要な解析機能と多くの市販解析コードの解析機能を調査した結果、適当な汎用熱流動解析コード、爆燃専用コード及び爆ごう専用コードを組み合わせ、一部の機能とインターフェースを追加すれば、目標とするコードシステムを期間内に実現可能であることが可能であることが分かった。

具体的なコードの選択に際しては、実績等も考慮の上、汎用熱流動解析コードとしてPhoenixsを、爆燃専用コードとしてAutoReaGasを、爆ごう専用コードとしてAUTODYNを選択した。なお、ソースコードを入手できる汎用熱流動解析コードの改造も検討したが、短期間での目標達成は極めて困難であると判断し、採用しなかった。

今後は、上記の結論と検討したスケジュールに基づいて、HTTR/HTGR - 水素製造システムのための火災・爆発挙動解析コードシステムを開発・整備する予定であり、次々年度には、これを用いた種々の計算結果をベースに、①蒸気雲爆発に対する合理的な安全裕度を有する評価方法を再構築するための検討、②大規模液面火災が発生した場合の大気流動変化の解明、③原子炉建家内における爆ごう対策の検討を行う計画である。

謝辞

本報告書作成に当り、有益なご指導を戴いた核熱利用研究部 宮本喜晟部長、同部熱利用システム研究室 塩沢周策室長、羽田一彦室長代理に、また有益な助言を戴いたコンピュータソフト開発株式会社、株式会社富士総合研究所、株式会社CRC総合研究所、川崎重工業株式会社の関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 西原哲夫、羽田一彦、塩沢周策、「高温ガス炉—水素製造システムの安全設計の考え方の提案（火災・爆発事故対策を中心に）」、JAERI-Research 97-022、(1997)
- (2) 羽田一彦外名、「高温ガス炉—水素製造システムの汎用性を有する安定な制御設計概念」、日本原子力学会誌、vol.38,No.10, pp834～844 (1996年)
- (3) Heiko Barnert, "Progress and Safety Aspects in Process Heat Utilization from Nuclear Systems", Proceedings of 3rd JAERI Seminar on HTGR Technologies, 241(1994)
- (4) 西田薫、伊藤英一郎、高木興一、山本浩平、「漏洩した Dense Gas の蒸発の影響を考慮した二層ボックスモデル」、大気環境学会誌、Vol31、No.3、111-121 (1996)
- (5) 岡本眞一、塩沢清茂、「高密度ガスの拡散予測について」、大気汚染学会誌、Vol.27、No.1、12-22 (1992)
- (6) N. C. Markatos, G. Cox, "HYDRODYNAMICS AND HEAT TRANSFER IN ENCLOSURES CONTAINING A FIRE SOURCE", PCH PhysicoChemical Hydrodynamics, Vol.5, No.1, 53-66 (1984)
- (7) 平野敏右、「燃焼学 —燃焼現象とその制御—」、海文堂出版、228 (平成8年)
- (8) 小林清志、荒木信幸、牧野敦、「燃焼工学 —基礎と応用—」、理工学社、249 (1995年)
- (9) 日本機械学会、「燃焼工学ハンドブック」、丸善株式会社、313 (1995年)
- (10) C.J.Hayhurst et.al, "Numerical Simulation of Explosive and Impact Loading and Response Using AUTODYN-3D and AutoReaGas", PROCEEDINGS OF THE ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON SHOCK & IMPACT LOADS ON STRUCTURES, SINGAPORE, 23-24 January 1996
- (11) 財原子力発電技術機構 原子力安全解析所、「平成8年度 シビアアクシデント時格納容器内熱流動解析手法の整備に関する報告書 —格納容器内水素挙動解析システムの構築—」、(平成9年)
- (12) 日本機械学会編、「流れの数値シミュレーション」、コロナ社、304、(昭和64年)
- (13) 水谷幸夫、香月正司、「コンピュータによる熱移動と流れの数値解析」、森北出版株式会社、198 (1985年)
- (14) 数値流体力学編集委員会編、「格子形成方法とコンピュータグラフィックス」、東京大学出版会、186 (1995年)
- (15) 森田、「火災モデルの種類と特徴」、火災、Vol43、No.5 (206)、5 (1993年)
- (16) 田中、「火災モデルの発展の経緯と将来の方向」、火災、Vol43、No.5 (206)、14 (1993年)
- (17) 上原、「火災モデルの国際的調和の動き」、火災、Vol43、No.5 (206)、206 (1993年)
- (18) 上原、「3次元フィールドモデルによる煙流動シミュレーション火災モデルの種類と特徴」、火災、Vol43、No.6 (206)、1 (1993年)
- (19) 長谷見、「火災のモデリングの適用限界」、火災、Vol43、No.6 (206)、1 (1993年)
- (22) 片山、相澤、田中、「衝撃成形シミュレーション (第3報：爆発成形解析手法の検討とそ

- の適用)」、平成2年度塑性加工春期講演会前刷集、635-638
- (23) 片山、戸田、木部、相澤、「衝撃解析コードによる相変化を伴う超高速変形シミュレーション」、第45会塑性加工連合講演会、463-466
- (24) 片山、相澤、「流体-構造物相互作用解析とその映像化」、構造工学における数値解析シンポジウム論文集、第14巻(平成2年7月)、P.27-32
- (25) 片山、田中、相澤、「爆発成形における衝撃波構造解析(第2報:K-H-Tの状態方程式による爆ごう過程の詳細シミュレーション)」、第42会塑性加工連合講演会、P.703-706
- (26) N.J.Robertson, C.J.Hayhurst and G.E.Fairlie, "Numerical simulation of explosion phenomena", IJCAT, Twenty Years of Finite Element Analysis: Review and Future Prospects, P.316-329
- (27) G.M.Zintilis and G.E.Fairlie, "SECURITY PROTECTION OF OFFICE BUILDINGS AGAINST BOMB", PROCEEDINGS OF THE ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON SHOCK & IMPACT LOADS ON STRUCTURES, SINGAPORE, 23-24 January 1996
- (28) E.Naesslund, U.Svensson and E. Karlsson, "Boundary-layer flow over Sundsvall", Computer-aided Fluid Engineering 5, S-602 10 Norrkoping, Sweden, P222-238
- (29) S.R.Green, "Modelling turbulent air flow in a stand of widely-spaced trees"
- (30) M.Katayama and T.Aizawa, "A Model for Fluid-Structure Interaction Problem with Inner Thin Shell Structures", J07/2, P.117-122
- (31) "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering
- (32) The PHOENICS Journal
- (33) α -FLOWによる熱と流れの解析研究会編、「 α -FLOWによる熱と流れの解析事例集I」、115(平成7年)
- (34) α -FLOWによる熱と流れの解析研究会編、「 α -FLOWによる熱と流れの解析事例集II」、141(平成8年)
- (35) α -FLOWによる熱と流れの解析研究会編、「 α -FLOWによる熱と流れの解析事例集III」、115(平成9年)
- (36) 「熱流動数値解析」特別専門委員会/「熱流動数値解析」研究専門委員会、「原子炉における熱流動数値解析の現状」、社団法人 日本原子力学会、402(1986年3月)
- (37) 「熱流動数値解析高度化」特別専門委員会、「原子炉における熱流動数値解析技術の高度化」、社団法人 日本原子力学会、280/186(1990年3月)
- (38) 「熱流動数値解析高度化」特別専門委員会、「原子炉における熱流動数値解析技術の高度化(II)」、社団法人 日本原子力学会、313/221(1991年3月)
- (39) K. K. Murata, et al, NUREG/CR-5026, SANDIA87-2309, "User's Manual for CONTAIN 1.1:A Computer Code for Severe Nuclear Reactor Accident Containment Analysis"
- (40) K. E. Washington, et al, NUREG/CR-5715, SANDIA91-0835, "Reference Manual for the CONTAIN 1.1 Code for Containment Severe Accident Analysis"
- (41) Proceeding of The Workshop on Severe Accident Research in Japan SARJ-96

Table 2.1 HTTR 原子炉施設の並列運転・高温試験運転時における
定格出力時主要条件

(1) 原子炉

熱出力 (MW)	30
原子炉冷却材 材質	ヘリウムガス
入口/出口温度 (°C)	395/950
入口/出口圧力 (kg/cm ² g)	40.2/40.0
流量 (t/h)	36.5
原子炉圧力容器 材質	2・1/4Cr-1Mo鋼NT材
最高使用温度 (°C)	440
最高使用圧力 (kg/cm ² g)	48

(2) 中間熱交換器

(条件：水素製造プラント接続時において2次ヘリウム出口温度が905°C)

交換熱量 (MW)	10
2次ヘリウム入口圧力 (kg/cm ² g)	41
2次ヘリウム流量 (t/h)	9.07
伝熱面積 (m ²)	244
最高使用温度 (°C)	
伝熱管	955
2次冷却材入口室	350
低温管板	430
最高使用圧力 (kg/cm ² g)	
伝熱管	3

Table 4.1 可燃性ガスの拡散

拡散の分類	説明
①分子拡散	温度に対応した分子・原子の並進運動により拡散
②乱流拡散	乱流渦の拡散とともにその中の化学種が拡散 k-ε型乱流モデルに基づく乱流拡散係数が広く使用されている
③大気安定度に依存した乱流拡散	例えば、日射量が大きいと地表近傍の空気は暖められて密度が小さく、対流が発生して乱流が生じる。この乱流により化学種が拡散する。なお、地上高さに対する温度勾配が大気安定性を表す1つの指標になっており、別な指標としてはPasquill-Giffordの大気安定度などがある。

Table 4.2 (a)コードが解析すべき現象と備えておくべき機能
(ガスの移流・拡散解析)

解析すべき現象	解析するための方法	コードに必要な機能
①放出部近傍の放出流による乱流拡散	k-ε乱流モデルで計算されるk、εより評価	①k-ε乱流モデルを有し、構築物等の影響が考慮できる機能
②風および建築物により発生する乱流拡散		
③大気安定性に依存した乱流拡散	Pasquill-GiffordのPG線図から求めた乱流拡散係数を使用する	②大気安定性に依存した乱流拡散が評価できる機能
④高度に依存した圧力及び密度の相違	重力を考慮した、圧力および密度の境界条件を設定	③高度に依存した圧力および密度の初期条件および境界条件を設定する機能

(蒸気雲爆発の燃焼解析)

解析すべき現象	解析するための方法	コードに必要な機能
①層流火炎から乱流火炎への連続的变化	アレニウス型反応モデルと渦崩壊モデルを乱流強度に応じて使い分ける	①アレニウス型反応モデルと渦崩壊モデルを有し、層流から乱流燃焼まで解析できる機能
②大空間内の火炎伝播	メッシュサイズの火炎伝播への影響をβ変換法により補正	
③燃焼の激しさに依存して、非圧縮性流れから、圧力波を伴う圧縮性流れまで変化	非圧縮性流れから圧縮性流れまで解析できるICE法等の計算スキーム	②β変換法によりメッシュサイズの影響を補正する機能
④大規模な燃焼ガスからの熱放射	燃焼過程の計算終了後に、燃焼ガスの形状、放射率、ガス温度、燃焼ガス温度と受光面の位置から計算	③ICE法等により非圧縮性流れから圧縮性流れまで解析できる機能 ④燃焼計算終了後に、任意の受光面の放射伝熱量を解析する機能

Table 4.3 必要な解析機能

	解析内容		その他 留意事項		
	現象	内容			
①原子炉 建家外部の開放空間 における火災・爆発	蒸気雲 爆発	①蒸気雲 形成	地下タンクピット等における液化ガスの漏洩の際の、地面からの受熱及び日射等による可燃性ガスの大量気化から蒸気雲が形成されるまでの過程を解析でき、蒸発率を計算できること。漏洩液化ガスのプールが瞬時に形成されたものと仮定してよいが、実際に起こると考えられる漏えい初期の大量蒸発を非保守的に評価しないよう考慮すること。	(a)多次元解析が可能なこと。 (b)風、地形、構築物等の地物の影響を考慮できること。 (c)高さによる圧力、密度の変化を考慮できること。 (d)放出ガス成分として最大10種類を考慮できることを原則とするが、これが不可能な場合には保守的な評価が可能なこと。	
		②対流・ 拡散	①の結果をベースに、形成された蒸気雲の対流・拡散過程を、層流域から乱流域に渡り解析することができ、任意の位置における各ガス成分の濃度変化を計算できること。但し、テイクオフまでの高密度ガスの挙動を現実的に評価できるモデルを採用すること。また、開放空間における乱流拡散を考慮できること。		
		③燃焼・ 爆発	①の結果をベースに、任意の時刻において、任意の点で着火した場合の燃焼・爆発過程を、層流燃焼から乱流燃焼に渡り解析することができ、燃焼域から周囲への放出エネルギー（熱と圧力）の推移を計算できること。但し、燃焼速度の格子依存性を解消するための手法を採用するとともに、火炎伝播速度が音速に近い場合については、非圧縮流れから圧縮流れまでを連続して解くための計算スキームを採用すること。		
		④熱伝達	①の結果をベースに、近隣の構築物の受熱量と温度の推移を計算するために必要なデータを出力可能なこと。		
		⑤圧力波 伝播	①の結果をベースに、発生した圧力波の伝播（反射、重ね合せを含む）を解析し、指定する構築物の受ける圧力の推移と過渡応答変形を計算できること。		
	液面 火災	①蒸発・ 拡散	地下タンクピットにおける液化ガスの漏洩面積と漏洩率を与えることによって、漏えい液化ガスのプール形成から着火までの可燃性ガスの蒸発・拡散過程、更には着火後の火炎からの放射熱等による蒸発・拡散過程を解析でき、任意の位置における各ガス成分の濃度変化を計算できること。		
		②燃焼	①の結果をベースに、液化ガスプール近傍で着火した場合の、層流域から乱流域までの拡散燃焼を解析でき、燃焼速度及び周囲への放熱量等を計算できること。		
		③熱流動・熱 伝達	①の結果をベースに、火炎による上昇気流の発生及び火炎への大気吹き込み等の大気熱流動を解析でき、指定する位置における風速及び風向等を計算できること。また、指定する構築物の受熱量と温度の推移を解析できること。なお、伝導、対流、放射を取り扱うことができ、構築物内部の温度分布も計算できること。		
	②原子炉建家内部の密閉空間 における火災・爆発	①対流・ 拡散	任意のコンパートメントの任意に位置に可燃性混合ガスの漏洩面積と漏洩率を与えることによって、放出ガスのコンパートメント内拡散とコンパートメント間拡散の過程を、層流域から乱流域に渡り解析することができ、任意の位置における各成分の濃度変化を計算できること。		(a)多次元解析が可能なこと。 (b)連通した多コンパートメント構造密閉空間の影響を考慮できること。 (c)放出ガス成分として最大10種類を考慮できることを原則とするが、これが不可能な場合には保守的な評価が可能なこと。
		②燃焼・ 爆発	①の結果をベースに、任意の時刻において、任意のコンパートメントの任意の点で着火した場合の燃焼・爆発過程を、爆燃から爆ごうまで解析することができ、燃焼域から周囲への放出エネルギー（熱と圧力）の推移を計算できること。		
③熱流動・熱 伝達		①が燃焼の場合、指定するコンパートメントの指定する構造物の受熱量と温度の推移を解析できること。なお、伝導、対流、放射を取り扱うことができ、構造物内部の温度分布も計算できること。また、①が爆燃～爆ごうの場合、建家内構造物の受熱量と温度の推移を計算するために必要なデータを出力可能なこと。			
④圧力波 伝播		①の結果をベースに、発生した圧力波の伝播（反射、重ね合せを含む）を解析し、指定する構造物の受ける圧力の推移を計算でき、応力解析が可能なこと。			

Table 4.4 汎用熱流動解析コードの機能比較

			Phoenics	α -Flow
屋外事象	蒸気雲爆発	蒸気雲形成		
		移流・拡散	△	△
		燃焼	○	△
		爆燃		
		爆ごう		
		熱流動・熱伝達	○	△
	圧力波伝播	△*	○*	
	液面火災	蒸発・拡散	○	○
		燃焼	○	△
		大気流動	○	○
熱伝達		○	△	
屋内事象	対流・拡散	○	○	
	燃焼	○	△	
	爆燃			
	爆ごう			
	熱流動・熱伝達	○	△	
	圧力波伝播	△*	○*	
備考			前提： 改造によって単一コード で対応	前提： 改造によって単一コード で対応

注記1) 符号の意味

○ ; 現状で解析可能

△ ; 機能はあるが、現状では不十分

空欄 ; 解析不可能であることを示す

添え字* ; 構造物等の変形挙動を解析するためには構造解析コードの併用が必要であり、連成解析は不可能である。

注記2) 必要な開発・整備項目の詳細は補足-2を参照のこと。

Table 4.5 爆燃解析コードの機能比較

			爆燃専用解析コード				格納容器内 燃焼～爆燃 解析コード	
			AutoRea- Gas	TM5-855	BLAPAN	SPLIT-X	MAPHY- BURN	CONTAIN
屋外事象	蒸気雲爆発	蒸気雲形成						
		移流・拡散						
		燃焼						
		爆燃	○	○	○	○		
		爆ごう						
		熱流動・熱伝達						
	圧力波伝播	○*	○*	○*	○*			
	液面火災	蒸発・拡散						
		燃焼						
		大気流動						
熱伝達								
屋内事象	対流・拡散					○	○	
	燃焼					○	○	
	爆燃	○				○	○	
	爆ごう							
	熱流動・熱伝達					○	○	
	圧力波伝播	○*						
備考			反射波/ 負圧発生 無視、爆 発点近傍 一様圧力 を仮定	反射波/ 負圧発生 無視	弾道威力 解析コード (軍事 用)	水素と一 酸化炭素 の燃焼の み、経験 式採用、 コンパ ートメント 雰囲気一 点集中モ デル	水素と一 酸化炭素 の燃焼の み、経験 式採用、 コンパ ートメント 雰囲気一 点集中モ デル	

注記1) 符号の意味

○ ; 現状で解析可能

空欄 ; 解析不可能であることを示す

添え字*; 構造物等の変形挙動を解析するためには構造解析コードの併用が必要であり、連成解析は不可能である。

Table 4.6 爆ごう解析コード

			爆ごう解析コード	
			AutoDyn	PISCES-2DELK
屋外事象	蒸気雲爆発	蒸気雲形成		
		移流・拡散		
		燃焼		
		爆燃		
		爆ごう	○	○
		熱流動・熱伝達		
		圧力波伝播	○	○
	液面火災	蒸発・拡散		
		燃焼		
		大気流動		
		熱伝達		
	屋内事象	対流・拡散		
		燃焼		
		爆燃		
爆ごう		○	○	
熱流動・熱伝達				
圧力波伝播		○	○	
備考			圧力波による構造物の変形も解析可能	販売中止

注記1) 符号の意味

○ ; 現状で解析可能

空欄; 解析不可能であることを示す。

Table 4.7 α -Flow 改造と Phoenics 連携の開発課題比較

			α -Flow改造	Phoenics連携
屋外事象	蒸気雲爆発	蒸気雲形成	▲	▲
		移流・拡散	▲	▲
		燃焼	△	○
		爆燃	▲	(○)
		爆ごう	▲	(○)
		熱流動・熱伝達	△	○
		圧力波伝播	○*	(○)
	液面火災	蒸発・拡散	○	○
		燃焼	△	○
		大気流動	○	○
		熱伝達	△	○
	屋内事象	対流・拡散	○	○
		燃焼	△	○
		爆燃	▲	(○)
爆ごう		▲	(○)	
熱流動・熱伝達		△	○	
圧力波伝播		○*	(○)	
備考			前提： 改造によって単一コード で対応	前提： 専用コードと併用

注記1) 符号の意味

○ ; 現状で解析可能。(○) は専用コードの併用によって解析可能

△ ; 修正によって解析可能

▲ ; モデル追加等の改造よって解析可能

空欄 ; 解析不可能であることを示す

添え字* ; 構造物等の変形挙動を解析するためには構造解析コードの併用が必要であり、連成解析は不可能である。

注記2) 必要な開発・整備項目の詳細は補足-2を参照のこと。

Table 4.8 解析コードの開発・整備計画

		平成8年度	平成9年度	平成10年度	平成11年度
解析コードの調査、必要機能の検討					
必要な解析機能の整備	①原子炉建家外部の開放空間における火災・爆発				
	②原子炉建家内部の密閉空間における火災・爆発				
検証性の確認					
インターフェースの開発・整備	①マン・マシンインターフェースの開発・整備				
	②コード間インターフェースの開発・整備				
パラメータ解析による簡易評価方法の安全裕度を特定					

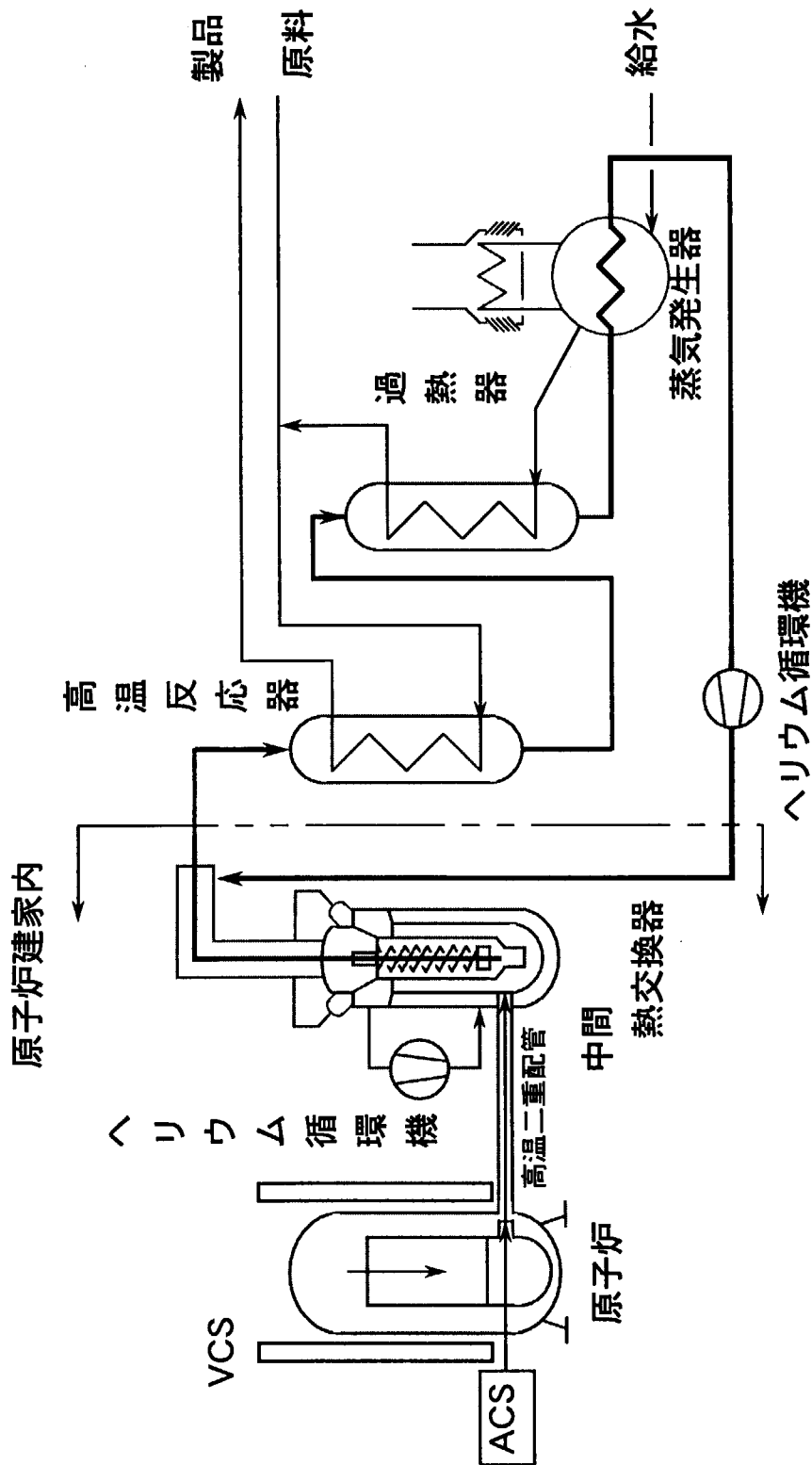


Fig.2.1 HTGR-水素製造プラントの系統構成
(2次系を有する場合)

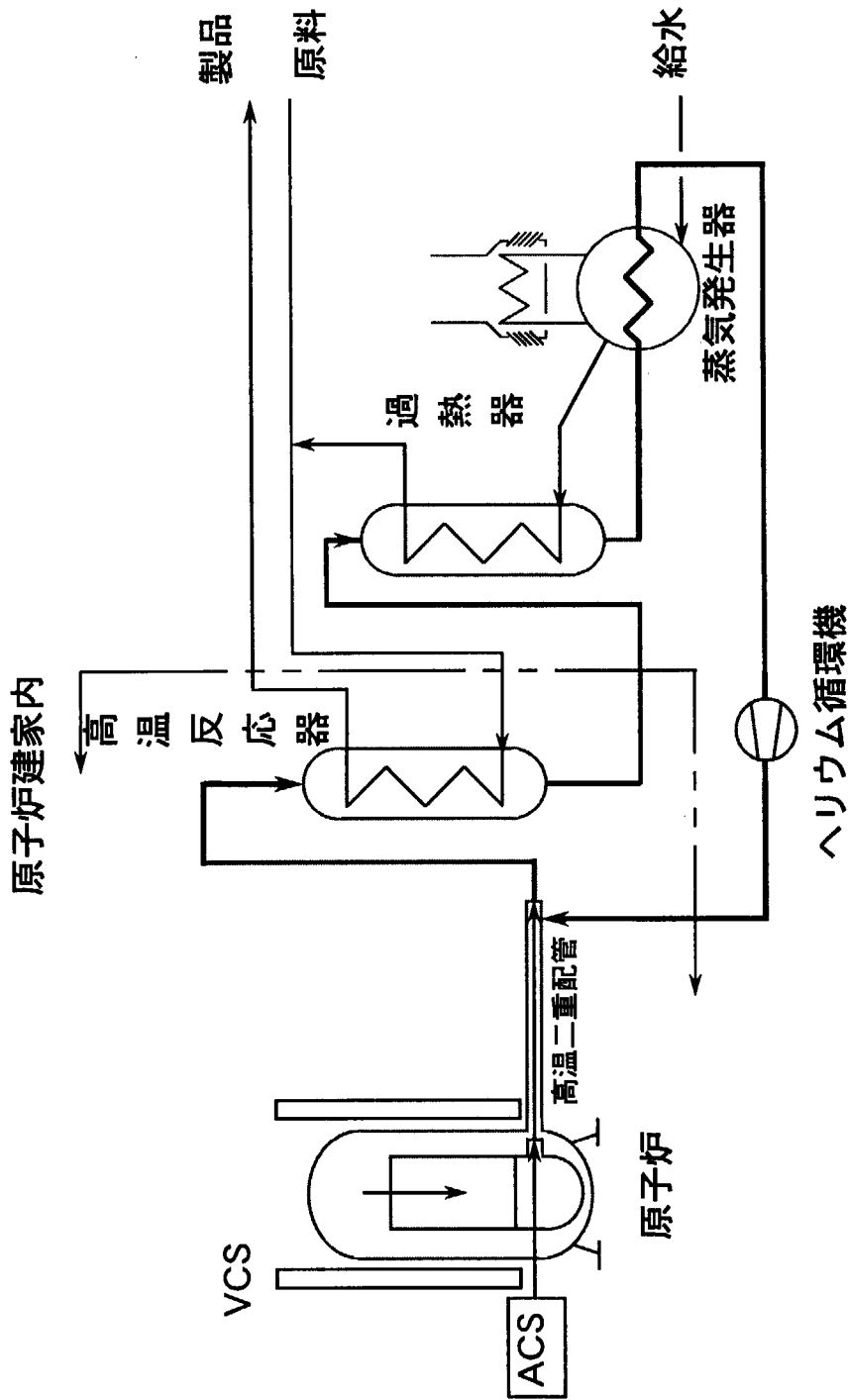


Fig.2.2 HTGR-H₂O 製造プラントの系統構成
 (2次系削除システムの場合)

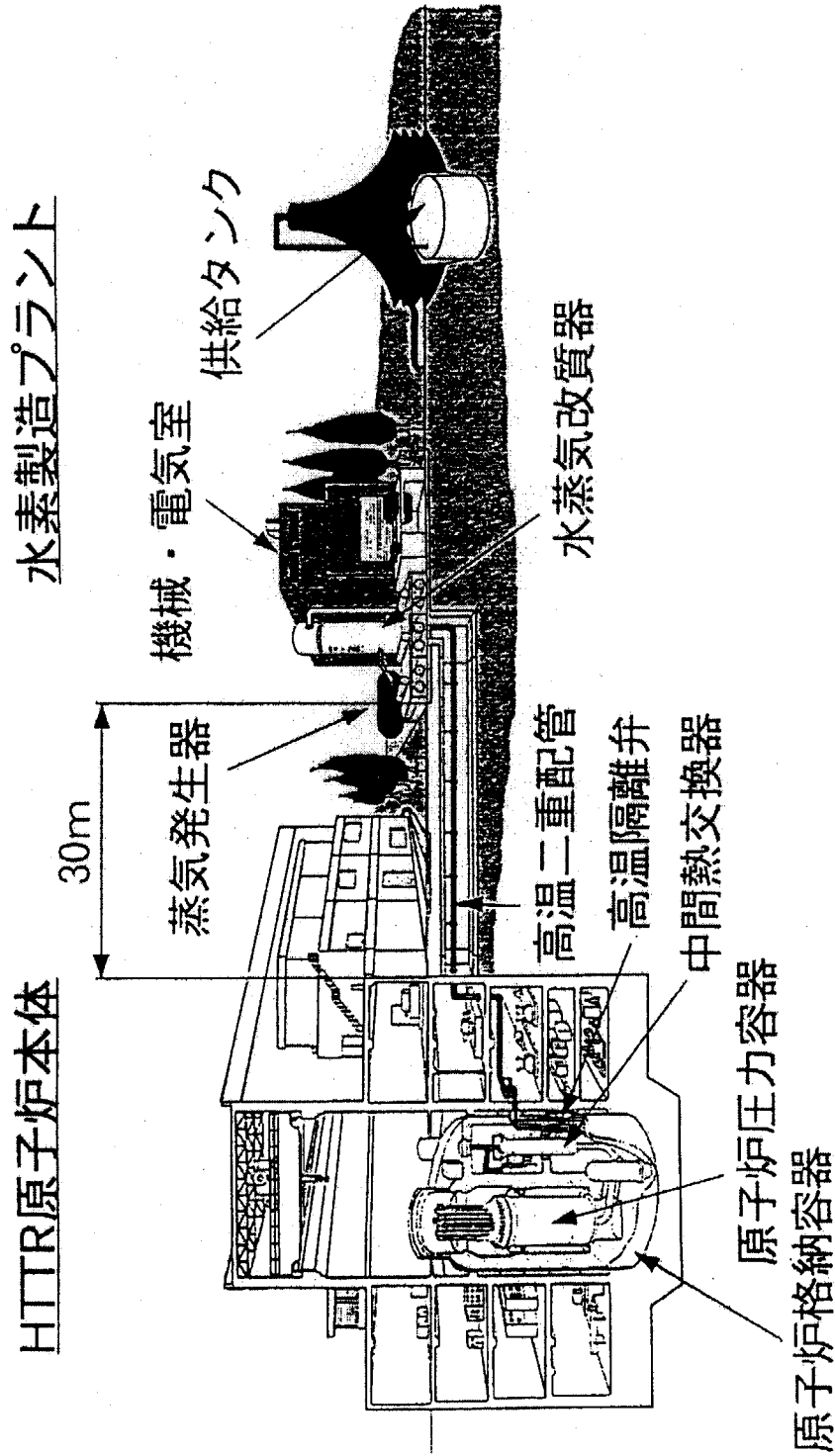


Fig.2.3 HTTR-水素製造システム
(HTTR原子炉本体と水素製造プラント)

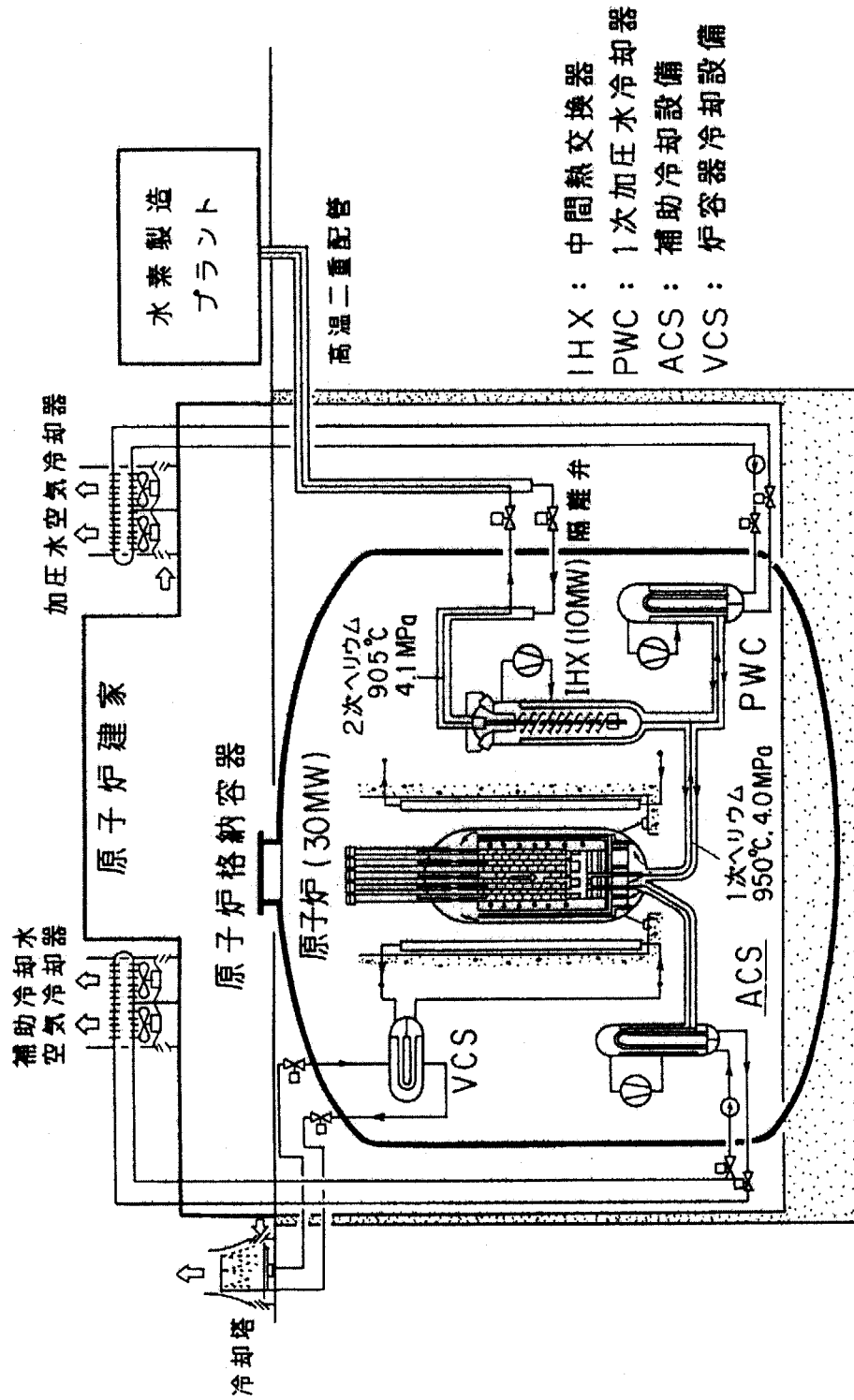


Fig.2.5 HTTR原子炉本体の系統配置図

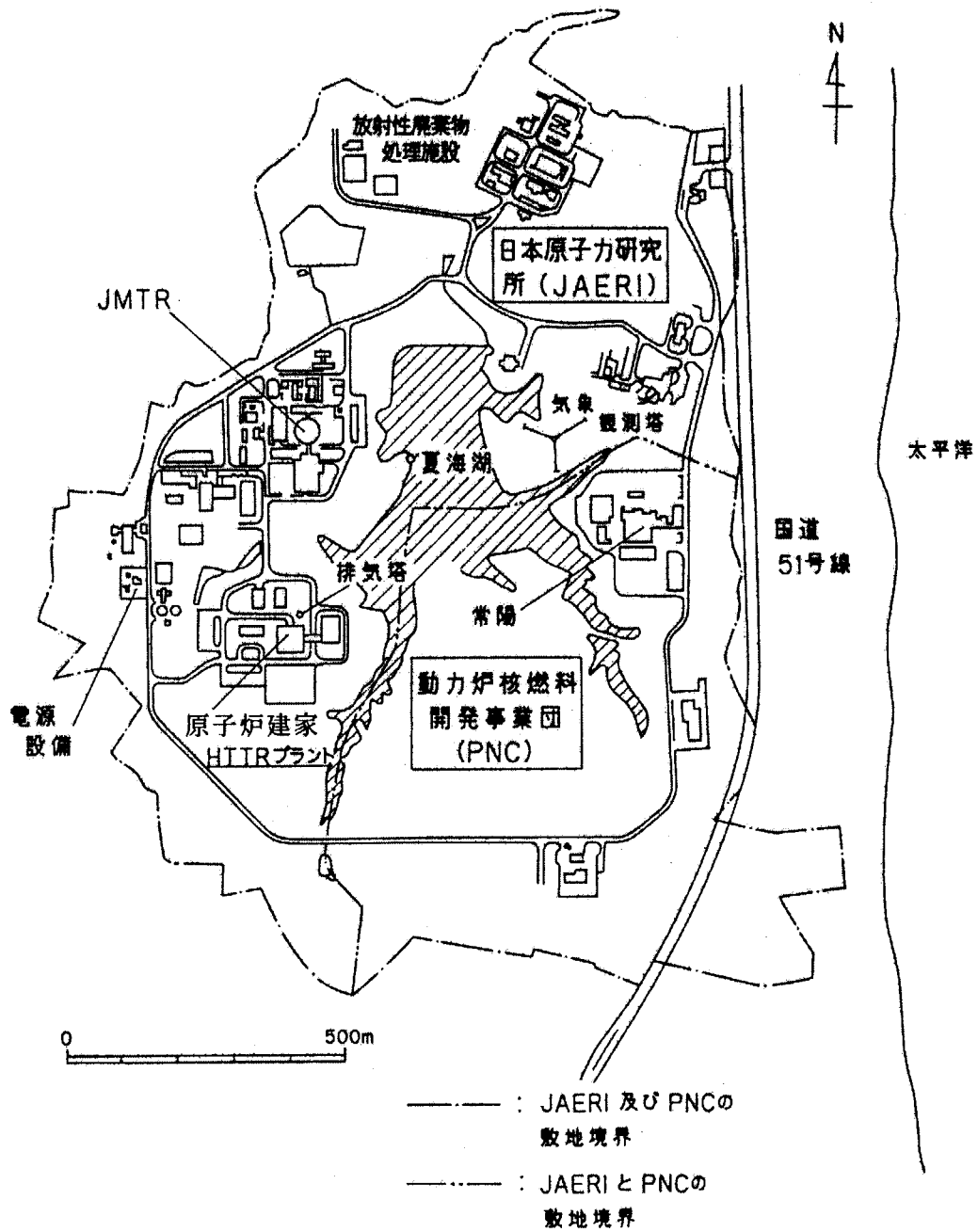


Fig.2.6 HTTRプラントの設置場所

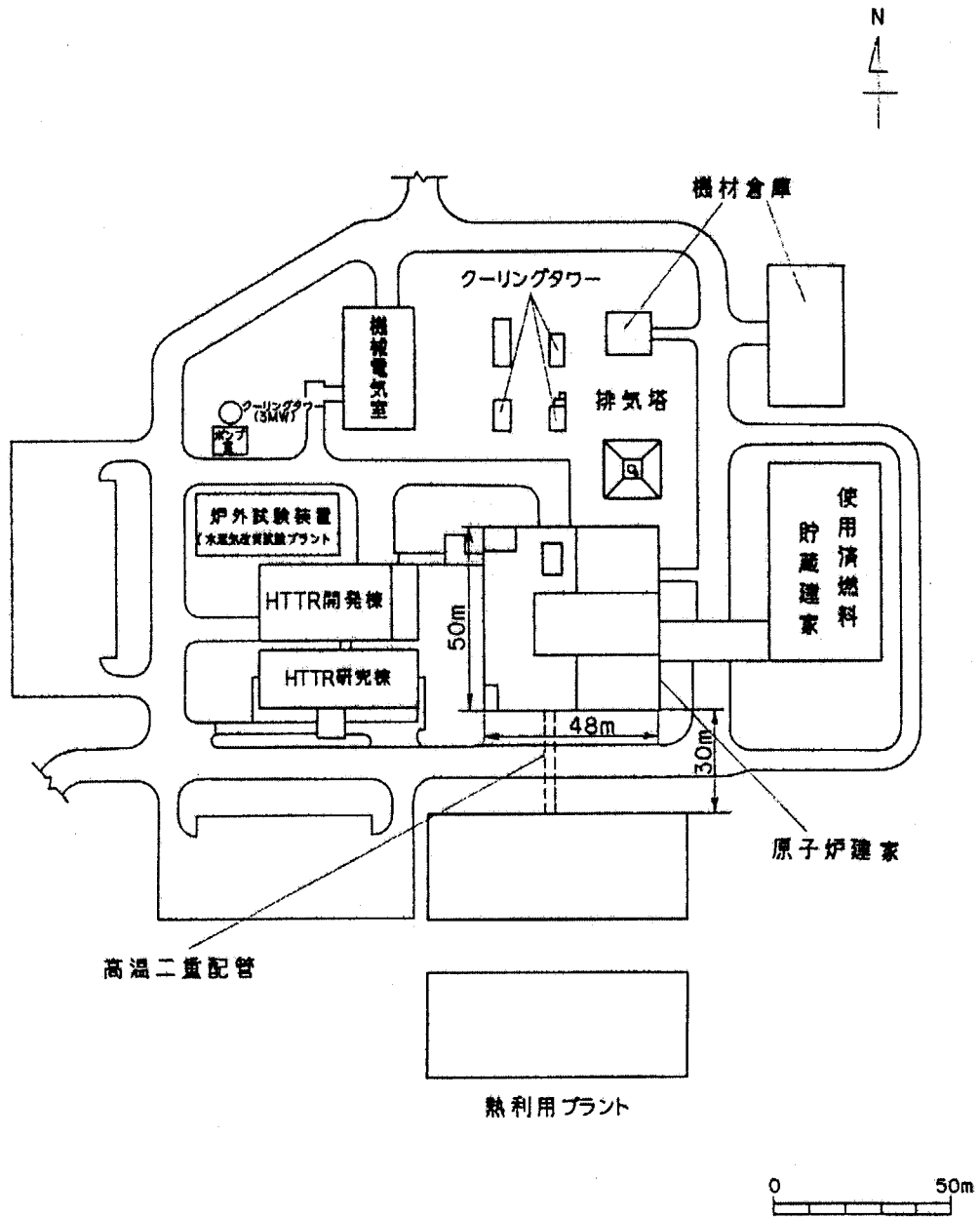


Fig.2.7 HTTR原子炉施設配置

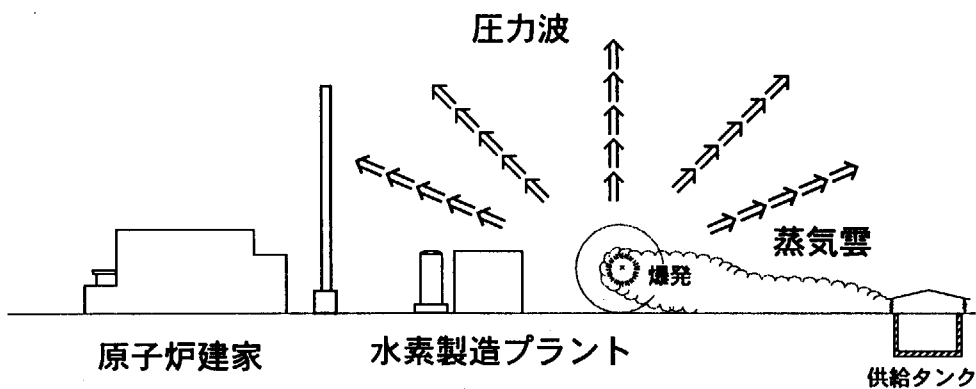


Fig.3.1 蒸気雲爆発

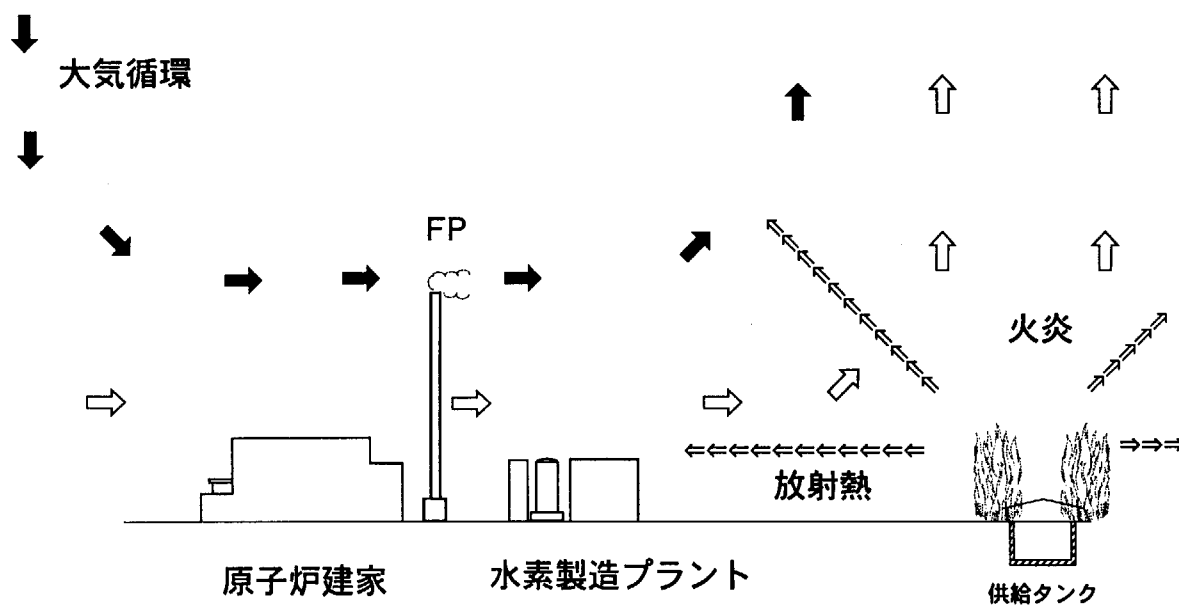


Fig.3.2 液面火災

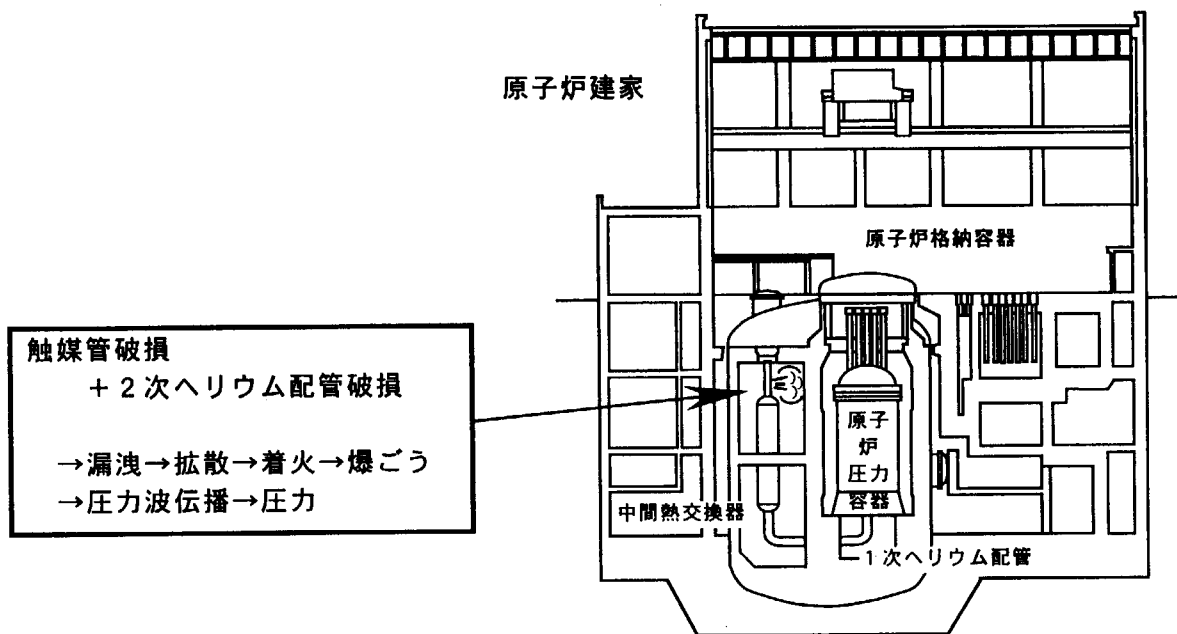


Fig.3.3 爆ごう

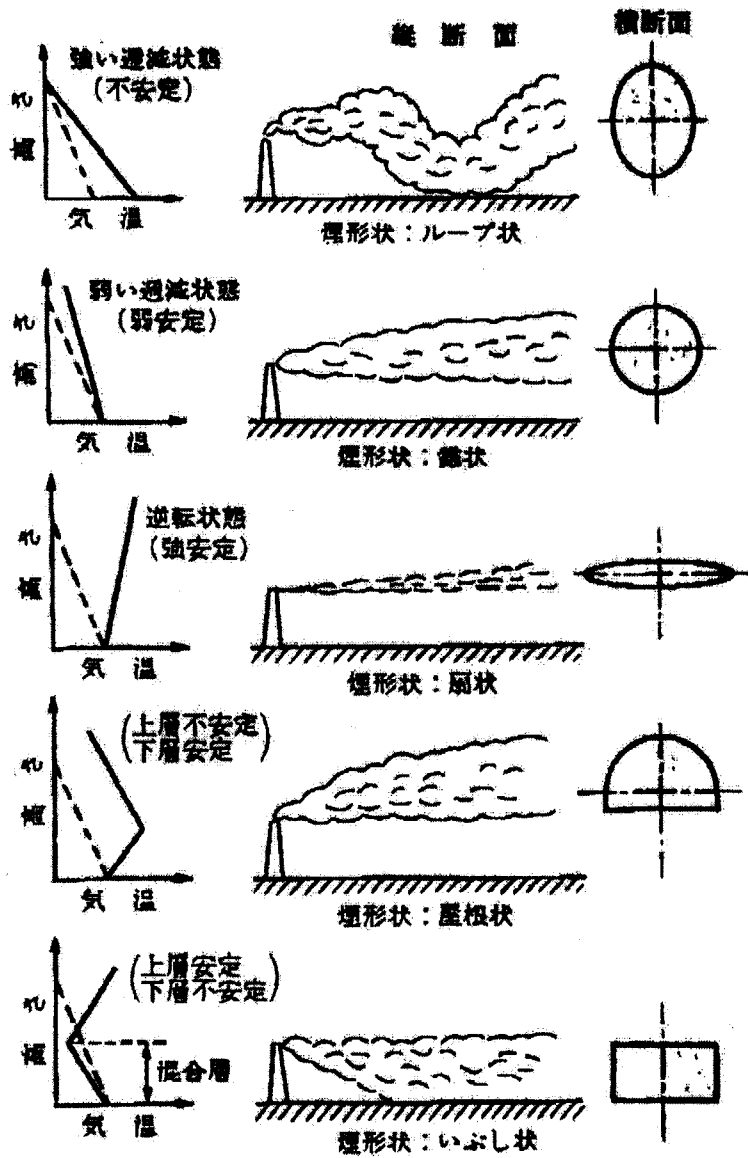


Fig.4.1 大気安定度（高度に対する温度変化）による煙突からの煙の拡散（破線は中立の状態における温度勾配 $=-0.098^{\circ}\text{C}/\text{m}$ を示す）

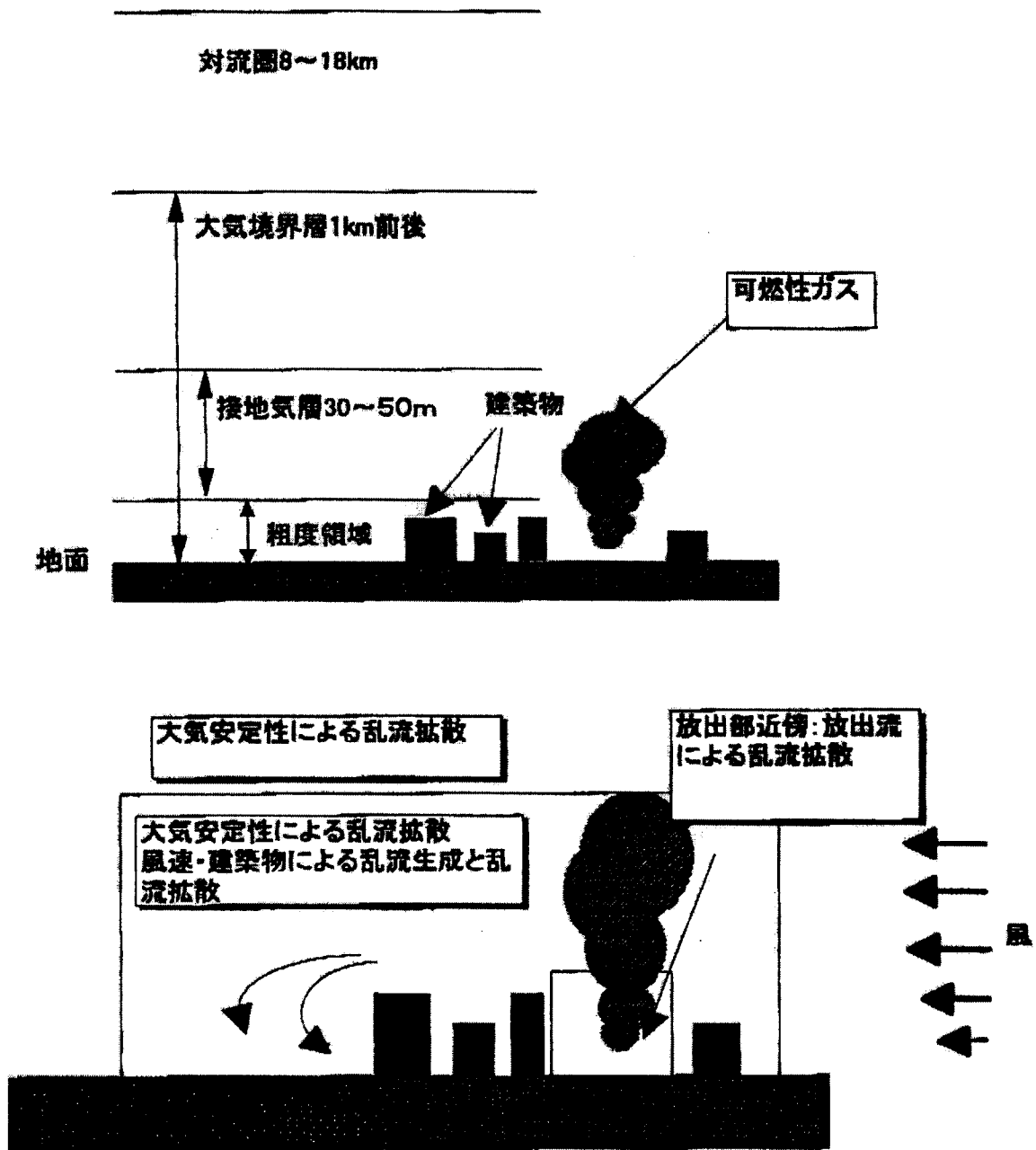


Fig.4.2 可燃性ガスの大気拡散

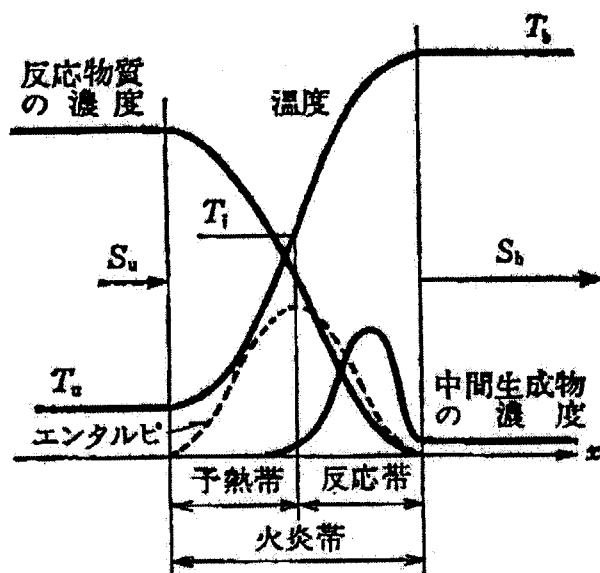


Fig.4.3 層流火炎内の構造概念図 (火炎伝播の熱理論の概念)

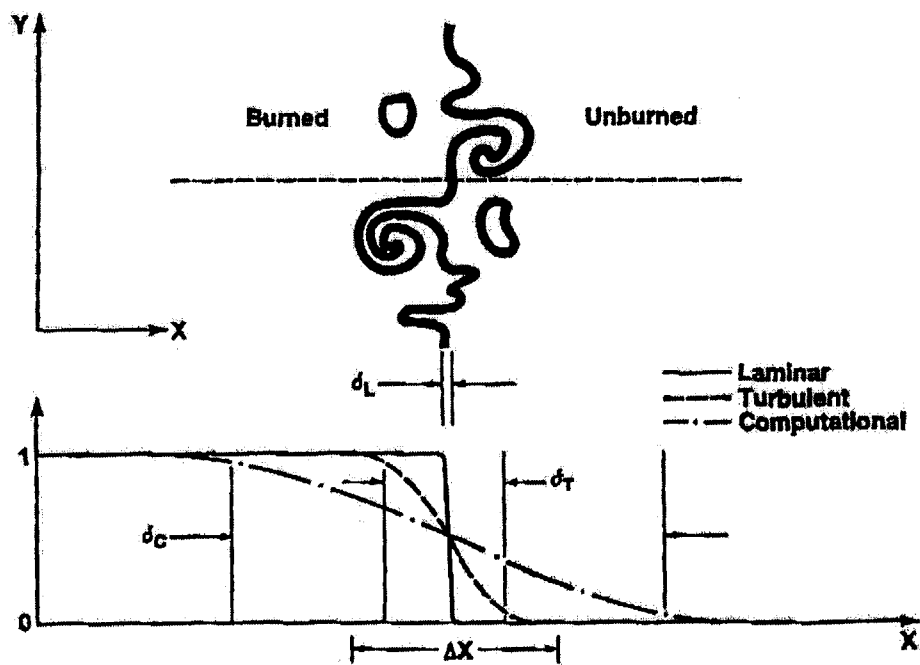


Fig.4.4 層流火炎と乱流火炎の厚みとメッシュサイズの関係

付録-1 主要コードの概要

1. 汎用熱流動解析コード

1.1 Phoenix コード

Phoenix コードはSIMPLE法の提案者であるSpaldingらによってCHAM社で開発されたコードであり、汎用熱流体解析コードとして広く利用されており、実績のあるコードである。Phoenix コードは汎用熱流体コードであるので、2相流、自由表面のある流れなど、多様な流体問題に適用できる。乱流燃焼モデルに渦崩壊モデルを用い、強い乱流燃焼も扱える。Phoenix コードでは、保存方程式をユーザーが追加したり、ユーザーが作成したサブルーチンを組み込むこともでき、Phoenix コードが持っている物理モデルで解析できない場合には、ユーザーがサブルーチンを作成し、組み込む事で対応することができる。拡散及び燃焼問題に対するPhoenix コードの特徴は以下の通りである。なお、構造物等の変形挙動等を解析するためには構造解析コード併用する必要があるが、連成解析は不可能である。

- ①圧縮性反応流の基礎方程式を有し、非圧縮性反応流まで解析できる
- ②有限体積法を採用
- ③BFC、非構造格子及び面交座標である
- ④k- ϵ 乱流モデル
- ⑤アレニウス型反応モデル、渦崩壊モデル及び平衡反応モデルの中から選択して使用
- ⑥固体表面同士の熱放射が考慮できる

1.2 α -Flow コード

α -FLOW コードは、通商産業省の支援のもとで民間企業と大学等の研究機関が協力して開発した汎用3次元流体解析システムであり、1992年に第1バージョンが完成した。解析機能は以下のようにモジュール化されており、解析手法は有限体積法でSIMPLE法を採用している。また、 α -Flow コードでは高度なプリ・ポスト処理方法が採用されている。なお、構造物等の変形挙動等を解析するためには構造解析コードを併用する必要があるが、連成解析は不可能である。

①非圧縮性流体解析モジュール：

- 対象 ：温度変化を伴う非圧縮性流体
- 座標系 ：デカルト座標、円筒座標、BFC
- 乱流モデル：k- ϵ モデル、渦動粘性係数モデル、LESモデル
- その他 ：ブシネスク近似による浮力の考慮が可能
物質移動モジュール、熱伝導モジュールと連成解析可能

②圧縮性流体解析モジュール :

- 対象 : 単相、1成分の亜音速、遷音速、超音速の主として定常解析
 座標系 : BFC
 乱流モデル: 代数乱流モデル (Baldwin-Lomax モデル)
 その他 : Chakravarthy TVD スキーム

③自由表面を含む非圧縮性流体解析モジュール :

- 対象 : 温度変化を伴う自由表面を含む非圧縮性流体
 座標系 : デカルト座標、円筒座標、BFC
 乱流モデル: $k-\epsilon$ モデル、渦動粘性係数モデル
 その他 : プシネスク近似による浮力の考慮が可能
 物質移動モジュール、熱伝導モジュールと連成解析可能

④燃焼・化学反応を含む流れ解析モジュール :

- 対象 : 単相多成分気体の燃焼化学反応を伴う亜音速、遷音速流れ
 座標系 : デカルト座標、円筒座標
 乱流モデル: $k-\epsilon$ モデル、渦動粘性係数モデル
 その他 : アレニウス型反応モデル (総括反応モデル、素反応モデル)、
 乱流燃焼モデル、着火/消炎モデル
 熱伝導モジュールと連成解析可能

⑤物質移動解析モジュール

- 対象 : 混入物の濃度が微量かつ流体に与える影響が無視でき移流拡散方程式で
 表現できる場合
 座標系 : デカルト座標、円筒座標
 乱流モデル: プラントルの混合長説に基づく渦拡散係数モデル
 その他 : 粒子の重力沈降、沈着、流体への影響をユーザ関数により考慮可能
 非圧縮流体モジュールと連成解析可能

⑥熱伝導解析モジュール

- 対象 : 流動を伴わない物体の熱伝導解析
 座標系 : デカルト座標、円筒座標、BFC
 その他 : 等価熱容量を用いて相変化の考慮可能
 形態係数、放射率の入力により放射の考慮可能
 非圧縮流体モジュール、燃焼・化学反応モジュールを伴う流れと連成解
 析可能

1.3 その他のコード

1.3.1 FIDAP コード

FIDAP コードは米国FDI社で開発された有限要素法を採用した汎用熱流体解析コードであり、燃焼解析以外の多様な熱流体挙動が解析できる。基礎方程式及び物理モデルは他のコードとの差はないと考えられる。有限要素法であるため、計算が不安定になるような問題では有限差分法より有効であると考えられる。拡散及び燃焼解析に対する特徴を以下に示す。なお、構造物等の変形挙動等を解析するためには構造解析コードを併用する必要があるが、連成解析は不可能である。

- ① 圧縮性反応流の基礎方程式を有し、非圧縮性まで解析できる
- ② 有限体積法で離散化し、有限要素法で解いている
- ③ 非構造格子
- ④ $k-\epsilon$ 乱流モデル
- ⑤ アレニウス型反応モデル、数種の渦崩壊モデル、平衡反応モデルを選択して使用
- ⑥ 固体表面同士の熱放射が考慮できる

1.3.2 FLUENT コード

FLUENT コードはCREARI社で開発された汎用熱流体解析コードである。基礎方程式及び物理モデルは他のコードと差はないと考えられる。解析手法も有限体積法でSIMPLE法を採用し、特に燃焼解析のために特別な物理モデルや解析手法を用いてはいない。なお、構造物等の変形挙動等を解析するためには構造解析コードを併用する必要があるが、連成解析は不可能である。

1.3.3 STREAM 及び SCREW コード

STREAM コード及びSCREW コードはCradle社で開発された汎用熱流体解析コードである。基礎方程式及び物理モデルは他のコードと差はないと考えられる。解析手法も有限体積法でSIMPLE法を採用し、特に燃焼解析のために特別な物理モデルや解析手法を用いてはいない。なお、構造物等の変形挙動等を解析するためには構造解析コードを併用する必要があるが、連成解析は不可能である。

2. 爆燃解析コード

2.1 AutoReagas コード

AutoReagas コードはCenturyDynamic社とTNOにより共同開発された爆発・爆風解析専用のコードである。TNOは爆発及び爆風に関する高度な専門的知識を有しており、それらをコードの中に反映されていることが、以下の特徴から推察できる。なお、構造物等の変形挙動等を解析するためには構造解析コード併用する必要があるが、連成解析は不可能である。

- ①圧縮性反応流の基礎方程式を有する
- ②有限体積法で直交座標である（開発者 Berg の論文より推測）
- ③FCT 法により圧力波を安定に計算
- ④k- ϵ 乱流モデル
- ⑤層流燃焼モデルと乱流燃焼モデルをレイノルズ数で切り替えて使用
- ⑥ β 変換法により燃焼速度の格子依存性を改善

2.2 TM5-855 コード、BLAPAN コード、SPLIT-X コード

TM5-855 コード、BLAPAN コード、SPLIT-X コードはいずれも爆発・爆風解析専用のコードである。詳細は不明であるが、TM5-855 コードと BLAPAN コードではいずれも非現実的な仮定を置いているため、圧力波通過後の負圧の発生を模擬できないことが、また TM5-855 コードではピーク圧を過大評価することが報告されている。一方、SPLIT-X コードはミサイル等の弾道の威力を評価するためのコードであることが分かった。なお、いずれのコードにおいても構造物等の変形挙動等を解析するためには構造解析コードを併用する必要があるが、連成解析は不可能である。

2.3 格納容器内燃焼～爆燃解析コード：MAPHY-BURN コード、CONTAIN コード

MAPHY-BURN コードと CONTAIN コードは、ともに、軽水炉のシビアアクシデント時の Ex-Vessel 事象を解析するためのコードであり、前者は三菱重工業(株)で開発され、後者は Sandia National Laboratories で開発された。これらは非常に多くのモジュールから成り、その一つに、水素燃焼発生時の格納容器健全性を評価するための、水素燃焼(燃焼～爆燃)解析モジュールがある。

水素燃焼解析モジュールでは、格納容器内を多数のコンパートメントに分割し、各コンパートメントの雰囲気を集中定数系として取り扱うとともに、ダクトやドア等の連通口を模擬した流路抵抗を持つノードでコンパートメント間を連結して、モデル化している。また、燃焼速度として経験式(実験式)を与えている。なお、構造物等の変形挙動等を解析するためには構造解析コードを併用する必要があるが、連成解析は不可能である。

CONTAIN コードには高速増殖炉用バージョン (CONTAIN-LMFBR コード) もあり、これでも同様のモデルが採用されており、水素燃焼とナトリウム燃焼を解析することができる。

3. 爆ごう解析コード

3.1 AUTODYN コード

AUTODYN コードは Century Dynamics, Inc. で開発された爆発・衝撃解析コードである。衝撃解析分野においては、爆発問題や高速衝突問題などのように、流体と構造物の衝撃的相互作用や、

大歪み、超高压の発生に伴う固体の流体化など固体・液体・気体の動的相互作用挙動を同時に扱えることが必須であるため、AUTODYNコードではこれが可能であり、以下のような特徴的な機能が与えられている。

- ①爆発解析機能がある
- ②陽解法を採用
- ③衝撃波前後における不連続な物理量の適切な表現方法として、J. von Neuman の疑似粘性を用いる手法を採用
- ④ Lagrange-Euler coupling
- ⑤対話型の Lagrangian rezoning 機能がある
- ⑥ Lagrangian の erosion 解析機能がある
- ⑦ Eulerian 手法に multiple-material Euler 計算機能がある
- ⑧ ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) やシェル計算機能がある
- ⑨使用できる材料モデルが豊富である
- ⑩材料モデル、境界条件、初期条件等の特殊なモデル化のためにユーザー・サブルーチン が使用できる
- ⑪プリ・ポスト処理機能が完備しており、使い易い
- ⑫対話型とバッチ処理の両方が可能

3.2 PISCES-2DELK コード

PISCES-2DELK コードは Physics International 社 (後に、PISCES 関係部門のみを独立させ、PISCES International Copr. を設立した) で開発された爆発・衝撃解析コードであり、その後、MSC (MacNeal-Schwendler Corp.) に著作権が譲渡され、販売・サポートされていた。しかし、高機能で安価な AUTODYN コードの開発・販売開始に伴い、営業上の理由から、1991年頃、販売・サポートが中止された。PISCES-2DELK コードの特徴は以下の通りである。

- ①爆発解析機能がある
- ②陽解法を採用
- ③衝撃波前後における不連続な物理量の適切な表現方法として、J. von Neuman の疑似粘性を用いる手法を採用
- ④ Lagrange-Euler coupling
- ⑤ Lagrangian の erosion 解析機能がある
- ⑥ Eulerian 手法に multiple-material Euler 計算機能がある
- ⑦使用できる材料モデルが豊富である
- ⑧材料モデル、境界条件、初期条件等の特殊なモデル化のためにユーザー・サブルーチンが使用できる

付録-2 乱流モデルについて

1. まえがき

乱流を記述する基礎式は既知であり、計算機的能力さえ十分であれば、直接シミュレーション (DNS) が可能であり、実際に行われるようになってきたが、現在のところ、その対象は周期的な境界条件を適用できるような単純な形状に限られている。また、今後のコンピュータの発達を楽観的に見込んでも、複雑な形状の乱流を基礎式の直接解によって再現しうる見通しは、予測し得る将来には難しいと言わざるを得ない。

そこで、乱流の工学的計算には、一般的には非定常ナビエ・ストークス方程式を時間平均したレイノルズ方程式が用いられている。レイノルズ方程式には、分子輸送による粘性応力の他に、慣性項に由来する乱流輸送による見かけの応力 (レイノルズ応力) が現われ、方程式の数より、未知数の数が多くなる。このため、レイノルズ応力と他の流れ変数との間の関係式を仮定しなければ、レイノルズ方程式系は閉じたものにならない。この方程式を閉じるための仮定が乱流モデルであり、種々のモデルが用いられている。

ここでは乱流モデルの調査を行い、実用性の観点から主として $k-\epsilon$ 乱流モデルを採用することにした経緯を示す。

2. 乱流モデルの分類

現在までに提案・採用されてきた乱流モデルとしては以下のようなものがある。

(1) 乱流変動を求める方法

- ① LES
- ② 3次精度風上差分法の利用

(2) 乱流変動を平均化し、アンサンブル平均量のみを求める方法

- ① ゼロ方程式モデル
- ② 一方程式モデル
- ③ 二方程式モデル
- ④ 応力方程式モデル

3. 乱流モデルの調査結果

文献調査の結果は以下の通りである。

3.1 乱流変動を求める方法

3.1.1 LES

乱流に含まれる渦のうち、小さい渦については何らかの普遍的な法則が成立すると期待できるため、格子以下のスケールの渦についてはモデル化（サブグリッドモデル）を行い、大きな渦についてのみ計算を行うようにしたものがLESである。この方法は、非等方性乱流場を扱え、比較的少数の格子点で乱流変動まで計算でき、他の乱流モデルに比べると経験定数の数が少ないため、有効な方法であり、現在では次第にかなり複雑な形状の乱流にまで適用されるようになってきている。

しかし、DNSに比べて少ないとは言え、数十万点以上の格子点を必要とし、やはり必ず非定常3次元の膨大な計算を行わなければならない点と、サブグリッドモデルが未だに確立されていない点に問題がある。

3.1.2 3次精度風上差分法の利用

格子以下のスケールの渦は乱流の大きなスケールの運動には寄与していないため、この部分については必ずしも厳密な取り扱いをする必要はないと考え、具体的なモデル化を行わず、数値粘性の作用によって乱流エネルギーを消散させる方法が、3次精度風上差分法を利用する方法である。

この方法は、比較的粗い格子でも特別に乱流モデルを使わず、乱流のシュミレーションができる便利な方法である。

しかし、レイノルズ数が高くなると正しい解が得られるという保証がないため、未知の領域に適用するには十分な注意が必要になる。

3.2 乱流変動を平均化し、アンサンブル平均量のみを求める方法

乱流粘性係数を導入する勾配モデルと、乱流粘性係数を用いない非勾配モデルに大別される。勾配モデルでは、分子輸送における輸送の類推から乱流輸送をモデル化し、乱流プラントル数（乱流シュミット数）を経験的に1に近い値に設定する。なお、このモデルは、乱流粘性係数の定め方によって、ゼロ方程式モデル、一方程式モデル、二方程式モデルに細分化される。一方、非勾配モデルは乱流粘性係数を導入することなく、変動の相関項を従属変数とする方程式を立て、その解としてレイノルズ応力や乱流輸送流束を求めるもので、応力方程式モデルが代表例である。

3.2.1 ゼロ方程式モデル

平均流についてのみ偏微分方程式を解き、乱流応力は代数関係式で与えるもので、Boussinesqの乱流（渦）粘性モデルとPrandtlの混合長モデルが代表的なものである。しかし、前者では局所的な乱れの状態に依存して大きく変化する乱流輸送を十分に表すことができず、一方、後者の場合には混合長の評価が明確にできない場合が多い、また共に乱流成分の履歴効果と乱流拡散効果を見逃しているため亜音速以上の圧力勾配の大きい流れでは良い結果を期待できない

どの問題がある。

3.2.2 一方程式モデル

乱流エネルギーなどの輸送方程式をレイノルズ方程式に追加し、乱流量の対流及び乱流拡散効果を考慮した最も簡単なモデルである。乱れエネルギー k についての微分方程式を用いており、長さスケール L を代数式で与える。代表的なものとして、Prandtl-Kolmogoroffの乱流粘性表示を用いるものと、乱流せん断応力が直接乱れエネルギーに比例するとして乱れエネルギーの式を応力方程式に置き換えて扱うBradshawらの方法がある。しかし、前者はゼロ方程式モデルに比して著しい改良がみられず、後者は壁近傍のエネルギー平衡層以外で使えない等の制限が多い。

3.2.3 二方程式モデル

乱れエネルギー k の輸送方程式の他に、もう一つの乱流量輸送方程式を追加して長さスケールを算出するものであり、乱れエネルギーの散逸率を用いる $k-\epsilon$ モデルと、渦度変動の自乗平均を用いるSaffmanらのモデルが代表的である。

ϵ を用いるモデルはHarlow-Nakayamaが初めて与えたもので、 $k-\epsilon$ モデルはJones-Launderにより低レイノルズ効果を含む形で提示され、Launder-Spaldingらによって整備・改良された。一方、Saffmanらのモデルは初期の頃には見られたが、 $k-\epsilon$ モデルによる解析結果が種々の流れに対して良好な結果を与えるとの理由から、ほとんど採用されなくなっている。

$k-\epsilon$ モデルはシンプルで実用的ではあるため、非常に多くの解析コードで採用され、解析例も多いが、以下の限界があることに注意を要する。

- ① 流れ場の実験データによって経験定数をチューニングする必要がある
- ② 非等方性が強い乱流場では、使用できない

3.2.4 応力方程式モデル

応力方程式モデルでは、非等方性乱流場を扱え、勾配モデルの欠点である速度、濃度、エンタルピ勾配がゼロとなる点での拡散流束の消失という問題は避けられるが、支配方程式の数と経験定数が増し、数値解析が煩雑になると同時に、経験定数の一般性が十分に吟味されていないという新たな問題が生じる。

4. 結論

数値計算の複雑さと種々の流れへの適応性のバランスを考えると、今回の解析に最も適しているのは $k-\epsilon$ モデルであると考えられる。 $k-\epsilon$ モデルは現在最も広く用いられ、従来モデルの問題点も

明らかになっており、問題点解決のための改良が盛んに行われている。従って、解析条件や精度等に特殊な要求がない限り、 $k-\epsilon$ モデルを採用したコードを用いれば、かなり広い範囲で妥当な結果を得ることができると思う。

付録-3 必要な開発・整備項目（機能の追加・修正）

目標解析機能を達成実現する方法として、ソースを入手可能な α -Flow コードの改造による機能追加を図る方法と複数の解析コードの組み合わせによる機能補完によって機能整備を図る方法を考えた。ここでは、それぞれの方法において必要となる開発・整備項目の抽出結果を示す。

1. α -Flow 改造のケース

		改造項目	
屋外事象	蒸気雲爆発	蒸気雲形成	①蒸気雲形成モデルの追加
		移流・拡散	①大気安定度に依存した乱流拡散モデルの追加
		燃焼	①層流燃焼から乱流燃焼まで連続して解析可能な補間モデルの追加
		爆燃	①メッシュサイズ補正プログラムの追加
		爆ごう	①爆ごうモデルの追加
		熱流動・熱伝達	①ガス放射モデルの追加
		圧力波伝播	①流体の挙動に関しては不要。但し、構造物等の変形挙動を解析するためには構造解析コードの併用が必要であり、連成解析は不可能である。
	液面火災	蒸発・拡散	①蒸発モデルの追加
		燃焼	①層流燃焼から乱流燃焼まで連続して解析可能なモデルの追加
		大気流動	不要
		熱伝達	①ガス放射モデルの追加
	屋内事象	対流・拡散	不要
		燃焼	①層流燃焼から乱流燃焼まで連続して解析可能な補間モデルの追加
		爆燃	①メッシュサイズ補正プログラムの追加
爆ごう		①爆ごうモデルの追加	
熱流動・熱伝達		①ガス放射モデルの追加	
圧力波伝播		①流体の挙動に関しては不要。但し、構造物等の変形挙動を解析するためには構造解析コードの併用が必要であり、連成解析は不可能である。	

2. Phoenics + AutoReaGas + AutoDyn のケース

			改造項目
屋外事象	蒸気雲爆発	蒸気雲形成	①蒸気雲形成モデルの追加
		移流・拡散	①大気安定度に依存した乱流拡散モデルの追加
		燃焼	不要
		爆燃	不要 (AutoReaGas)
		爆ごう	不要 (AutoDyn)
		熱流動・熱伝達	不要
		圧力波伝播	不要 (AutoReaGasまたはAutoDyn)
	液面火災	蒸発・拡散	不要
		燃焼	不要
		大気流動	不要
		熱伝達	不要
	屋内事象	対流・拡散	不要
燃焼		不要	
爆燃		不要 (AutoReaGas)	
爆ごう		不要 (AutoDyn)	
熱流動・熱伝達		不要	
圧力波伝播		不要 (AutoReaGasまたはAutoDyn)	

注) AutoDyn では圧力波を受ける構造物の変形挙動も解析できる。

付録-4 用語

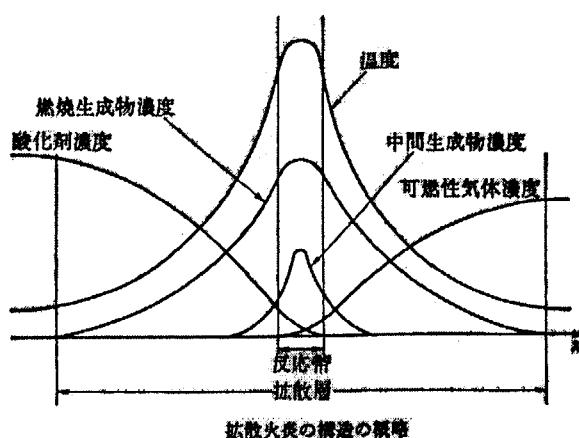
1. 現象

拡散燃焼

反応帯の両側に分かれている可燃性物質と酸化剤が反応帯に拡散して燃焼する燃焼形態。

拡散燃焼において、火炎は化学反応が盛んに起こっている反応帯に生じる。反応帯は可燃性気体と酸化剤の境界に存在し、反応帯に向かって可燃性気体と酸化剤が拡散してきて化学反応を生じる。反応速度（燃焼速度）はそれらが反応帯に向かって拡散する速度に依存する。（下図参照）

拡散燃焼における火炎は、火炎付近の流れの状態によって、層流拡散火炎と乱流拡散火炎に分類される。



火災

火災とは、燃焼現象による災害（異常な自然現象や人為的原因によって、人間の社会生活や人命に受ける被害）のことである。

IAEA 安全シリーズ No.50-SG-D2(Rev.1)では、①煙または焰あるいはその両者を伴った熱放出が特徴の燃焼過程、②急激な燃焼で時間的にも空間的にも制御ができないように広がるもの、と定義されている。

層流火炎

気体の燃焼において、気体の流れが層流であるか乱流であるかによって、燃焼の形態が大きく異なる。層流の場合、流動摩擦、熱及び物質の移動即ち混合は微視的な分子レベルで行われ、層流火炎を形成する。

燃焼

一般に発熱と発光を伴う現象の総称を燃焼という。燃焼現象は、下記のように、種々の分類がなされている。

燃焼が起こる相に関して：①固相燃焼、②液相燃焼、③気相燃焼、④固液界面燃焼、
⑤液気界面燃焼、⑥気固界面燃焼

燃焼する物質に関して：①可燃性物質=酸化剤燃焼、②分解燃焼、③複合燃焼

可燃性物質あるいは分解燃焼性物質の初期状態に関して：

①均一燃焼、②不均一燃焼

可燃性物質と酸化剤の混合に関して：

①予混合燃焼、②拡散燃焼

燃焼反応が伝播する波の構造に関して：

①燃焼、②爆ごう

爆ごう

圧力波がひきおこす断熱圧縮による温度上昇を原因として伝播する燃焼の一形態である。伝播速度は音速より早く、波面にはノイマンスパイクと呼ばれるピークが生じる。燃焼速度が十分早い場合には、チャップマン-ジュゲの理論で伝播速度を計算できる。

上述のように、爆ごうにおいては、圧縮波である衝撃波が反応波面に先行するという特徴がある。

爆燃

熱伝導や熱伝達による温度上昇を原因として伝播する燃焼の一形態であり、通常の燃焼であるが、特に急激に燃焼波が伝播するものを言う。爆燃においては、膨張波が生じ、反応面で圧力降下を生じるという特徴がある。

爆発

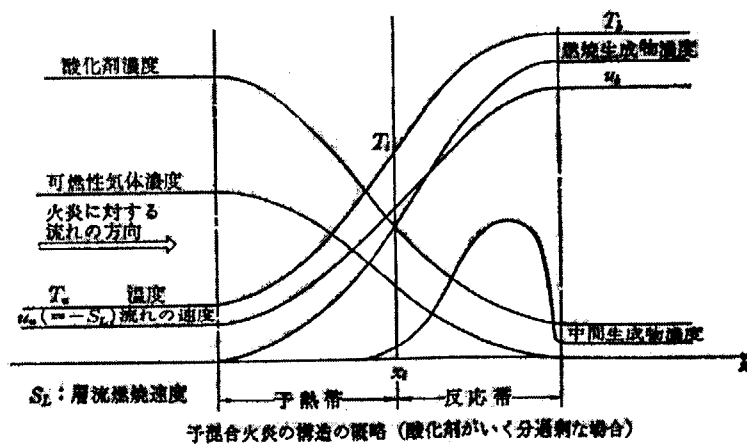
一種の燃焼反応であり、気体の発生を伴い、反応速度が極めて大きく、急激な温度上昇と急激な圧力上昇をともなう。

IAEA 安全シリーズ No.50-SG-D2(Rev.1)では、急激な酸化又は分解反応でその結果温度又は圧力、あるいは両者が同時に上昇するもの、と定義されている。一般的には爆燃と爆ごうを爆発と呼んでいる。

予混合燃焼

燃性物質と酸化剤が予め混合してから燃焼する燃焼形態。予混合燃焼において、火炎は化学反応がほとんど起こっていない予熱帯と反応帯に存在する。火炎に近づく温度 T_u の混合気は、予熱帯において主として反応帯からの熱により温度上昇し、反応帯に達すると、そこで活発な反応を起こし、反応がほぼ終了したとき温度 T_b の燃焼ガスとなり、火炎から離れていく。(下図参照)

予混合燃焼における火炎は、火炎付近の流れの状態によって、層流予混合火炎と乱流予混合火炎に分類される。



乱流火炎

気体の燃焼において、気体の流れが乱流の場合、巨視的な乱れや渦によって、混合の規模と速度が著しく大きく、乱流火炎を形成する。

2. 解析

ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian)

Lagrange の方法と Euler の方法の中間的な方法であり、格子点を空間に任意に配置した上で、Euler座標系として空間に固定しておくことも、Lagrange座標系として流体とともに動かすこともでき、適用範囲が広い。

β 変換法

座標変換の原理に基づき、火炎内の小さなスケールを、メッシュサイズの数倍のスケールに拡

大する方法である。大規模空間における火炎伝播を解析する場合、空間メッシュが火炎の厚さに対して非常に大きくなり、解析上、火炎が安定に維持されなくなることが多く、これを避けるために β 変換法を用いる。

β 変換法では、下記の β を求め、エネルギー及び質量の拡散係数に β を乗じて、反応速度を β で除することで、燃焼速度を保存したまま火炎厚みを拡大することができる。

$$\beta = \max\left(1, \frac{(c\Delta X)^2 \nabla T}{\delta \Delta T}\right)$$

ここで、 c は拡大する火炎厚みのメッシュ数、 δ は火炎厚み、 ΔX はメッシュサイズ、 ΔT は火炎前後の温度差、 ∇T は火炎面法線方向温度勾配を示す。

BFC (Boundary Fitting Coordinate)

流体解析において、物体の境界の形状に沿って作成した空間差分格子のこと。複雑な境界形状を対象とする場合、直交格子や円筒格子を採用するより精度が向上するという利点があるが、計算時間が長くなるという欠点がある。

DNS (Direct Simulation Navie-Stokes)

Navie-Stokesの式を非常に細かい計算格子で、直接数値的に解く方法で、2次精度以上の高精度の差分法を使う。非等方性乱流場を扱うことができ、経験定数をチューニングする必要がないことが長所であるが、膨大な計算時間とメモリを要する。

Eulerの方法 (Eulerian 手法)

連続体力学の表現方法の一つで、空間に固定された差分メッシュ上を物質のみが移動していくような表現方法。その代わりにセル面を通じての物質の移流を計算することによって物質の変形過程を模擬する。通常は複雑な変形をする流体に対して適用される。

FCT 法

圧縮性流体の解析において、圧力波をシャープにかつ安定に解くための手法で、衝撃波面近傍において必要な箇所に必要なだけの人工拡散を与える手法である。

ICE 法 (Implicit-Continuous Fluid Eulerian)

時間積分における非線形セミ陰解法の代表例であり、非圧縮流れから超音速まで精度の良い解を求めるために開発されたものである。定式化は、連続の式と運動量保存式の圧力勾配を陰に取り扱い、時間ステップ幅が音速に制限されない。

k- ϵ モデル

乱流モデルの1つで、乱流エネルギーkと乱流エネルギー消散率 ϵ の輸送計算を行い、これらから渦粘性を求める時間平均モデルである。

Lagrange の方法 (Lagrangian 手法)

連続体力学の表現方法の一つで、物質の変形と共に差分メッシュが動いていくような表現方法。通常は、比較的変形の小さい固体に対して適用される。

Lagrange-Euler coupling

1つの計算モデルの中で、固体のモデル化に適したLagrangeの方法と流体のモデル化に適用性を持つEulerの方法を同時に使い、しかもその相互作用を扱うことをLagrange-Euler couplingと呼ぶ。相互作用の計算は、CauchyとEulerの応力原理を用いることによって実現される。

衝撃解析分野においては、固体・液体・気体の動的相互作用(例：爆発問題、高速衝突問題等)における流体と構造物の衝撃的相互作用や大歪み、超高圧の発生に伴う固体の流体化)を同時に扱えることが不可欠である。

Lagrangian の erosion 解析機能

固体は破壊条件(相当塑性歪み)に達すると破壊し材料強度を持たなくなるが、このような場合、固体をLagrange座標系で単純にモデル化しただけでは、格子点間の拘束力がなくなり、それぞれ自由な方向に動きだすため(幾何学的歪みが増大するため)計算が異常終了する。そこで、異常終了を防止するため、ある歪みに達した場合にはそのメッシュを除去し、取り除いたことによって生じた相互作用面を検知し正しく作用するように修正をかける必要がある。これらの機能をLagrangianのerosion解析機能という。

Lagrangian rezoning

Lagrangeの方法の場合、Lagrange座標系同士での相互作用を計算する必要があり、複雑な変形

が予想されるため、計算途中でのメッシュ切り替えが必要になる。このメッシュ切り替えを Lagrangian rezoning と呼ぶ。

multiple-material Euler 計算機能

超高速変形問題においては固体の流動化が生じるため、固体に対して Euler の方法が用いることが多い。multiple-material Euler 計算機能はそのための機能である。

SIMPLE 法

非圧縮性流れから圧縮性流れ（亜音速から超音速の流れ）まで解析する事ができるので、広範囲な流体問題を解析しなければならない汎用流体解析コードに適した計算手法であり、多くの汎用流体解析コードがこの手法を用いている。

TVD (Total Variation Diminishing)

流れのスムーズな所で高次精度を維持し、不連続な部分を鮮明にすることができるよう考慮し、全変動が増加しないという条件に基づいて合理的に計算を行う方法をさまざまに拡張したスキームのこと。

アレニウス型反応モデル

化学反応速度がアレニウスの反応速度式に従うとするモデル。この場合、反応速度は $D \times \exp(-E/RT)$ と表され、ここで D は反応に固有な定数、 E は活性化エネルギー、 R は気体定数、 T は反応温度である。

渦崩壊モデル

一般に化学反応速度は反応するガスの濃度と温度に依存する。しかし、乱流が強くなると化学反応速度は乱流渦の崩壊速度に依存するようになる。これをモデル化したものが渦崩壊モデルである。

解適合格子 (solution-adaptive grid)

流れの場の計算と連動させて衝撃波などの流れの激しいところに格子点を集中して計算精度を改善する方法である。構造格子では格子点を移動させる方法が、非構造格子では移動させる方法だけでなく、追加・削除する方法が多く用いられる。

境界適合格子

物体境界に沿った格子

差分法 (Finite-distance method)

差分式は微分法における導関数を求める極限操作を行う前の段階の式であり、微分法が連続関数の演算法であるのに対して、差分法は離散関数の演算法である。差分法では、計算領域は流れ場を覆う格子の格子点で、流れの変数は格子点上に定義される離散関数で、境界条件や初期条件を差分方程式で置き換えて表す。

シェル計算機能

薄板構造物の変形を取り扱うための機能。

素反応モデル

複雑な化学反応をいくつかの最も簡単な基本的反応に分解して考える時、その個々の反応を素反応という。多くの反応は2つ以上の素反応が逐次進行する連続反応であると考えられる。

素反応モデルでは、対象とする反応系に含まれる多くの反応過程について、独立に、反応速度を設定して、各化学種の組成変化を計算する。しかし、反応機構や反応速度が明らかになっているのは、 H_2-O_2 、 $CO-O_2$ 、 CH_4-O_2 、 CH_3OH-O_2 、 $C_2H_2-O_2$ 、 $C_2H_4-O_2$ 、 $C_2H_6-O_2$ 等に過ぎない。

総括反応

複雑な構造を持つ物質の燃焼や化学反応の解析に際しては、複雑な反応機構を1つの代表的な反応で表し、その反応に対して反応速度を設定する総括反応モデルが用いられる。

当量比

$$\equiv (\text{燃料モル数} / \text{酸素モル数})_{\text{対象気体}} / (\text{燃料モル数} / \text{酸素モル数})_{\text{化学量論比気体}}$$

爆ごうパラメータ

爆ごう物質の①初期密度、②初期の比内部エネルギー (単位質量当りの化学エネルギー)、③爆ごう速度、④状態方程式のことで、これらを連続流体力学コードに入力することによって、爆ごう現象を解析することができる。

* AUTODYN や PISCES-2DELK コードでは、爆ごうパラメータの計算に、
 CCS < FORTRAN IV COMPUTER PROGRAM FOR CALCULATION OF
 THERMODYNAMIC AND TRANSPORT PROPERTIES OF COMPLEX CHEMICAL
 SYSTEMS (NASA Lewis 研究所開発) > を使用しており、反応気体の化学組成、当量比、
 初期圧力、初期温度から、可燃性混合気中を伝播する爆ごう波のチャプマンジュゲ特性値
 (C-J 特性値：爆ごう速度、爆ごう後の温度、圧力、エンタルピ、エントロピ、比熱比、音
 速等) 及び生成物のモル分率を計算し、これらから爆ごうパラメータを計算している。
 また、爆ごうパラメータの計算に、CHEMKIN < Fortran Chemical Kinetics Code Package >
 を使用しているコードもある。

非構造格子

格子点の並びに規則性をもたないもの。格子形成が容易であり、格子点の追加・削除が比較的
 容易なため、解像度を上げるほうほうとして有効である。一方、非構造型による計算時間と計算
 容量の増大、構造格子で用いられる近似因数分解法や収束加速法の適用が困難なこと、ベクトル
 計算機や並列計算機への対応に特別の工夫が必要なこと等の問題点がある。

非スタaggerド格子

通常の流体計算では、流体が圧力差によって駆動される機構を扱いやすいように、圧力と速度
 の計算点を交互に配置するスタaggerド法が用いられる。一方、圧縮性流体においては圧力と速
 度はリーマン不変量として表される密接な関係があり、個別の位置で計算するのは不都合な場合
 がある。この対策として、圧力と速度を同じ位置で計算する格子配置を非スタaggerド格子とい
 う。但し、非スタaggerド格子は圧力差によって流体を駆動する機構を直接表せないため、
 チェッカーボード不安定 (格子の一つおきに高圧と低圧を繰り返す不安定) 等の数値不安定が生
 じやすい。

ポーラスメディア法

形状近似の精度を上げるための解法。流れ領域中に存在する固体幾何学的効果を、volume
 porosity (多孔性) と surface permeability (透化性) を各基礎式に導入することによって考慮し、物
 理的効果を分布抵抗や分布熱源として考慮する。

有限体積法 (Finite-volume method)

2次元では有限面積法 (Finite-area method) とも呼ばれ、滑らかでない格子にも適用でき、格
 子形成法が普及する前には広く使われていた。簡便な方法で、境界条件も取り扱いやすいが、精
 度を上げにくい。有限体積法では、セルを検査体積に取り、積分形で表した基礎方程式を用いる。

有限要素法 (Finite-element method)

流れの領域を多くの要素に分割し、各要素毎に1次式、2次式等の多項式で近似して求めるものである。

This is a blank page.

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
物質質量	モル	mol
光度	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	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表5 SI接頭語

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

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 ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射	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	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
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
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

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 - ン	b
バ - ル	bar
ガ - ル	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラ - ド	rad
レ - ム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

(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、1 eV および 1 u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、ヘクト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。

換算表

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

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

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

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

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

高温ガス炉・水素製造システムの技術開発における火災・爆発解析コードの開発・整備方法の検討(受託研究)