JAEA-Technology 2014-030



高温ガス炉の炉内材料に対する照射損傷評価法の整備

Development on Radiation Damage Calculation Method for HTGR In-core Structural Material

> 深谷 裕司 後藤 実 柴田 大受 Yuji FUKAYA, Minoru GOTO and Taiju SHIBATA

原子力科学研究部門 原子力水素・熱利用研究センター 小型高温ガス炉研究開発ユニット

Small-sized HTGR Research and Development Unit Nuclear Hydrogen and Heat Application Research Center Sector of Nuclear Science Research

August 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(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) 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-Technology 2014-030

高温ガス炉の炉内材料に対する照射損傷評価法の整備

日本原子力研究開発機構

原子力科学研究部門 原子力水素・熱利用研究センター

小型高温ガス炉研究開発ユニット

深谷 裕司、後藤 実、柴田 大受

(2014年6月20日 受理)

高温ガス炉の炉内材料に対する照射損傷評価法に関する研究を行った。初めに、照射損傷評価法に関する理論および評価法の調査を行った。次に、一般的に使われている炉定数作成コード NJOY を用いた DPA 断面積評価手法を含めた DPA 評価法を整備した。これらの評価を簡便に実施するため、先行研究で開発された NJOY をソルバーとして組み込んだ DPA 評価コードシステム NPRIM の機能を包絡するシステムの開発を行った。さらに、今後の評価手法の高度化に関する課題の抽出を行った。

JAEA-Technology 2014-030

Development on Radiation Damage Calculation Method for HTGR In-core Structural Material

Yuji FUKAYA, Minoru GOTO and Taiju SHIBATA

Small-sized HTGR Research and Development Unit, Nuclear Hydrogen and Heat Application Research Center, Sector of Nuclear Science Research Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received June 20, 2014)

A study on radiation damage calculation method for in-core structural material of HTGR had been performed. Firstly, a theory and a calculation method for radiation damage were investigated. Secondly, a DPA cross-section calculation method using NJOY, which is the typical reactor constants generation code, was established. Moreover, DPA calculation method was established. To evaluate these evaluations simply, calculation method was developed including the function of NPRIM which includes NJOY code as a solver and was developed in previous study. In addition, necessary items were identified to improve the method for accuracy.

Keywords: Radiation Damage Calculation, HTGR, DPA, NJOY

目 次

1.	序論	• 1
2.	DPA 評価法	- 2
3.	DPA 評価手法の整備	- 5
ć	1 NPRIM コードの機能と本研究の DPA 評価法の機能	- 5
ć	2 開発コードによる処理と NJOY コードの入力ファイル	• 6
ć	3 GUI システムについて	· 10
ŝ	4 開発コードの検証	• 11
ę	5 DPA評価法の検討と今後の課題	· 12
4.	結論	• 14
謝		· 15
参	文献	• 16
付备		
113	A 照射損傷の理論及び評価法について	• 17
付金	A 照射損傷の理論及び評価法について B 断面積の種類及び性質	- 17 · 18
付到付到	 A 照射損傷の理論及び評価法について B 断面積の種類及び性質 C DAMOCLES コードシステムについて 	- 17 - 18 - 21
付針付針	 A 照射損傷の理論及び評価法について B 断面積の種類及び性質 C DAMOCLES コードシステムについて D 開発コードの使用法について 	- 17 - 18 - 21 - 25

Contents

1.	Introduction	· 1
2.	Evaluation Method of DPA	$\cdot 2$
3.	Development of Evaluation Method for DPA	• 5
	3.1 Function of NPRIM Code and Code to be Developed	• 5
	3.2 Process of Developed Code and Input File for NJOY Code	· 6
	3.3 GUI System	· 10
	3.4 Validation of Developed Code	• 11
	3.5 Study on DPA Evaluation Method and Subject	$\cdot 12$
4.	Concluding Remarks	· 14
Ac	cknowledgements	$\cdot 15$
Re	eferences	· 16
Ap	opendix A Theory of Radiation Damage and Evaluation Method	$\cdot 17$
A	opendix B Variety and Characteristics of Cross Section	· 18
Ap	opendix C DAMOCLES Code System	$\cdot 21$
Ap	opendix D Usage of Developed Code	$\cdot 25$
Ap	opendix E Program License	· 28

図リスト

Fig. 3	3.1 DPA 断面積評価のための NJOY 入力	9
Fig. 3	3.2 標準入出力をファイル入出力に変更するためのパッチ	9
Fig. 3	3.3 本開発による DPA 断面積の ASTM E694-01 の DPA 断面積との比較結果	11
Fig. 3	3.4 ガンマ線エネルギーの局所付与の効果	12
Fig. I	B.1 point wise 断面積と group wise 断面積の比較(U-235 核分裂断面積)	18
Fig. I	B.2 エネルギー自己遮蔽効果の模式図	19
Fig. (C.1 Inventory クラスの模式図	22
Fig. (C.2 Nuclide クラスの模式図	22
Fig. I	D.1 入力ファイルの概要	25
Fig. I	D.2 GUI の概要	25
Fig. I	D.3 Configuration Panel	26
Fig. I	D.4 Calculation Panel	26
Fig. I	D.5 出力結果	27

1. 序論

原子炉内において、原子炉材料は中性子による照射損傷により物性が変化する。そのため、 材料の照射特性を知るために照射試験が行われ評価式が整備される。一方で、照射損傷自体は 直接的に測定することが困難であり、一般的に計算により評価される。この計算で得られた照 射損傷を基に、実験により得られた物性値が評価式として整備されるため、照射損傷評価法の 精度は評価された実験式の精度に直結し、正確な評価が必要となる。

現在、日本原子力研究機構および東洋炭素株式会社、イビデン株式会社、東海カーボン株式 会社、新日本テクノカーボン株式会社は、カザフスタン共和国核物理研究所(INP)および国際 科学技術センター(ISTC)のパートナープロジェクトのもと、黒鉛の表面に炭化ケイ素等を被 覆した耐酸化特性を向上させた黒鉛材料の照射特性を調べるため、INPの所有する WWR-K 炉 を用いて照射試験 ¹⁾を実施する計画を進めている。ここで得られる照射試験結果を整理するた め、より詳細な照射損傷評価手法の整備が重要である。

本研究では、上記の試験に必要な評価法を整備するのみではなく、今後の高精度化も目的と し研究を行う。そのために、照射損傷の評価に関する理論の確認と評価法に関する調査を行う。 評価法は先行研究で開発された NPRIM³⁾コードと同様に、一般的に用いられている炉定数作成 コード NJOY²⁾を用いて整備する。さらに、NPRIM コードの機能を包絡するものとする。

NPRIM コードの特徴を以下に示す。

- ・NJOY コードをソルバーに持つシステムである。(コードシステム内に NJOY を含む)
- ・640 群構造の Displacement Per Atom (DPA)断面積を評価する。
- ・任意の群数の中性子束を 640 群に内挿する。
- ・Graphical User Interface (GUI)による操作ができる。(OS は Windows と Mac に対応)

上記の通り、NPRIM コードは NJOY コードの利便性を高めるためのインターフェースシス テムとして整備されてきた。一方で、今回の DPA 評価では、INP により評価されるモンテカ ルロ法中性子輸送コードによる中性子束を用いることが予定されるため、統計誤差の評価 DPA に対する伝播を評価する必要があったが、NPRIM コードでは誤差伝播の評価が行えなかった ため、新たなシステムを開発する必要があった。誤差伝播の評価には、NPRIM コードの中性 子束を 640 群に拡張する方法は適さない。一般的にユーザーが設定するエネルギー群数は数群 から数十群程度であり、今回の評価でも同程度のエネルギー群数の使用が予定されている。中 性子束の群数を拡張するに伴い、その誤差も拡張する必要がある。正規分布を想定し拡張した エネルギー群毎の中性子束強度の平方根に比例する形で、等価な誤差を想定することも可能で あるが、不確かさや操作ミスが混入する可能性があり適した処理法とは言えない。また、NJOY による DPA 断面積作成の過程において、ユーザーが供給する中性子束を用い滑らかな関数を 内挿により作成し、エネルギー群縮約の重みとすることにより、精度を落とさずにエネルギー 群縮約が実現できることを考えると、ユーザーの指定するエネルギー群数をそのまま用いるこ とのほうが、利便性、精度の両面からも有利であることは自明である。これらのことを考慮し、 先行研究により整備された手法の精度を落とさずに、任意のエネルギー群構造の中性子束の処 理ができ、統計誤差の伝播も考慮できる手法を整備する。

2. DPA 評価法

ここでは、一般的に用いられ NJOY コードの処理法にも採用されている DPA(付録 A 参照) の評価法について確認する。この確認は、評価法の問題点を確認する目的でも必要であるが、 DPA 評価が材料物性に必要とされる一方で、そのメカニズムは核物理に関する知識が必要であ り、その使用においては核データに関する知識が必要となるため、評価法を本研究で整備した コードシステムを用いて使用する場合も知っている必要がある。DPA は以下のようにあらわす ことができる。

$$DPA = \frac{N_d}{N} = \int_0^{t_i} \int_0^\infty \int_{E_d}^{E_{p,max}} \nu(E_p) \frac{d\sigma(E, E_p)}{dE_p} \phi(E, t) dE_p \, dE \, dt \quad (2-1)$$

ここで、

N:ターゲットの個数密度(cm⁻³)

N_d: はじき出し総数(cm⁻³)

E:入射中性子のエネルギー (eV)

Ep:Primary Knock-on Atom (PKA)の反跳エネルギー (eV)

 t_i :照射時間 (s)

v(E_p):はじき出し関数(-)

 $\frac{d\sigma(E,E_p)}{dE_p}$:微分(散乱)断面積(barn/eV)

φ(E,t):中性子束

である。

PKAの反跳エネルギーは分布を持つため、断面積は微分断面積の形となる。微分断面積と中 性子束の積は、エネルギーEを持つ中性子の衝突により、反跳エネルギーEpをもつ PKA が発 生する反応率を表す。次に、PKAのエネルギーEpによりカスケード損傷が発生し、はじき出 される原子の総数(PKA を含む)を表すのがはじき出し関数v(*E*_p)である。はじき出し総数を ターゲット個数密度で規格化しているため、ミクロベースの反応率のような演算となっている。 一般的に、式(2-1)は以下のように DPA 断面積を用いて表される。

$$DPA = \int_0^{t_i} \int_0^\infty \sigma_{DPA}(E)\phi(E,t)dE dt \qquad (2-2)$$

$$\sigma_{DPA}(E) = \int_{E_d}^{E_{p,max}} \nu(E_p) \frac{d\sigma(E, E_p)}{dE_p} dE_p \qquad (2-3)$$

この DPA 断面積は国際標準規格の一つである ASTM⁴により、用途に合わせ断面積の値自体が 標準規格として定められている。 DPA 断面積の評価には一般的に NRT モデル ⁵が用いられる。はじき出しはキンチン・ピー スら ⁶によりはじき出しエネルギーEd の 2 倍の逆数を比例係数として、PKA エネルギーに比 例することが示されており、はじき出し効率κ(経験的に 0.8 が用いられる)及び、連続的な関数 で与えられる PKA の損傷効率f(ε)を用い以下のように与えられる。

$$\nu(\mathbf{E}_p) = \kappa \frac{f(\varepsilon)\mathbf{E}_p}{2\mathbf{E}_d} \tag{2-4}$$

なお、損傷効率は以下のように与えられる²⁾。

$$f(\varepsilon) = [1 + F_L g(\varepsilon)]^{-1} \qquad (2 - 5)$$

$$\varepsilon = \frac{E_p}{E_L} \tag{2-6}$$

$$g(\varepsilon) = 3.4008\varepsilon^{1/6} + 0.40244\varepsilon^{3/4} + \varepsilon \qquad (2-7)$$

$$E_L = 30.724Z_p Z_L \left(Z_p^{\frac{2}{3}} + Z_L^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{2}{3}} (A_p + A_L) / A_L$$
 (2-8)

$$F_{L} = \frac{0.0793Z_{p}^{\frac{2}{3}}Z_{L}^{\frac{1}{2}}(A_{p} + A_{L})^{\frac{2}{3}}}{\left(Z_{p}^{\frac{2}{3}} + Z_{L}^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{3}{4}}A_{p}^{\frac{3}{2}}A_{L}^{\frac{1}{2}}}$$
(2-9)

ここで、Z は原子番号 A は質量数、L は格子原子を表す。

微分断面積に関しては、断面積の値を規格化すれば PKA スペクトルと呼ばれる PKA のエネ ルギー分布関数に帰結できる。PKA スペクトルは衝突におけるエネルギー保存を考えれば、散 乱余弦の関数として整理される。散乱余弦の確率分布は ENDF ファイルに収録されており、評 価が可能である。これらのデータは弾性散乱以外で必要となる 2 次粒子に関するデータも含ま れる。

ここまでの処理法は一般的なものであり、どのコードシステムにおいても大きな違いはない。 一方で、PKA 粒子の反跳エネルギーの付与に関する考え方は、NJOY コード特有のものである。 PKA 粒子の反跳エネルギーの付与は弾性散乱反応以外でも発生し、核反応による発生エネルギ ーも付与される。このような、中性子束による局所的なエネルギー付与はカーマと呼ばれる物 理量で評価されることが多い。カーマの単位としては eV・barn のように、エネルギーとミク ロ断面積の積であり、原子個数密度とカーマ値と中性子束の積は中性子により局所的に付与さ れるエネルギーの発生率を表す。このカーマは照射損傷の他に発熱評価などにも用いられる。 この評価法には、直接法とエネルギーバランス法がある。直接法では、カーマは以下のように 表すことができる。

$$\mathbf{k}_{ij}(\mathbf{E}) = \sum_{l} \bar{E}_{ijl}(E) \,\sigma_{ij}(E) \tag{2-10}$$

ここで、

E:入射中性子エネルギー(eV)

k_{ii}:i 核種の j 反応のカーマ値(eV・barn)

 \bar{E}_{iil} : i 核種のj反応の1粒子の運動エネルギー(eV)

σ_{ii}: i 核種の j 反応の断面積(barn)

エネルギーバランス法では、カーマは以下のように表すことができる。

$$k_{ij}(E) = (E + Q_{ij} - \bar{E}_{ijn} - \bar{E}_{ij\gamma})\sigma_{ij}(E)$$
 (2-11)

ここで、

Q_{*ij*}:i 核種の j 反応の Q 値(eV)

 \bar{E}_{iin} : i 核種の j 反応による 2 次中性子による全エネルギー(eV)

 \bar{E}_{iiv} : i 核種の j 反応による 2 次光子による全エネルギー(eV)

NJOY コードでは、直接法評価に必要なデータが初期の ENDF/B バージョンの核データに 含まれていないとの理由で、エネルギーバランス法を採用している ²⁾。一方で、エネルギーバ ランス法に関しては、整備されるデータ間の不整合により大きな誤差が発生すると報告 ⁷⁾がな されている。はじき出しのメカニズムを考えるとその名称が表しているように直接法が直接的 なモデル化を行っており、信頼できる評価が期待できる。

このように、NJOY コードの処理の特徴としては、PKAの反跳エネルギー評価においてエネ ルギーバランス法を用いていることであり、その精度が疑問視される場合がある。この誤差は 中重核に顕著であるとの報告がなされており、今回は黒鉛材料の評価に用いられるため、軽核 が対象になること、解析結果検証用の直接法による下限値と上限値の評価がなされ、結果の妥 当性の確認ができることなどから、今回の使用に限っては NJOY コードを用いたエネルギーバ ランス法ベースの評価を用いても問題がないと考えられる。しかし、今後は中重核の利用も想 定して直接法による評価手法が整備されることが望ましい。

3. DPA 評価手法の整備

序論で述べたように、本研究では、一般的に用いられている炉定数作成コード NJOY コード を用いた DPA 評価手法を整備する。本研究で開発するコードの処理では、入力として評価済 み核データと重みづけに使用する中性子束を与え、NJOY コードを用いた DPA 断面積が評価 される。その DPA 断面積と中性子束を用い開発コードに整備したモジュールにより、統計誤 差の伝播を考慮した DPA の評価を行う。NJOY コードを用いて DPA 断面積等を評価するには、 プログラムの構造、処理内容、核データに関する知識への精通が必要となる。これは、NJOY コードが核データに精通し、プログラムのソース文を読み修正できるユーザーを想定して整備 されているためである。NJOY コードの使い方はモジュール毎に分けられたプログラムのソー ス文の文頭に記載されたおり、この使用法を直接読み確認するのが通例とされる。出力される データは ENDF フォーマットであり、解読するには経験が必要となる。このように、NJOY コードを不慣れなユーザーが直接利用することは多くの労力を必要とし、誤用が発生する危険 性がある。

一方で、ある程度限られた使用においては、一つの処理に特化した入力ファイルを整備し、 必要箇所のみを変更することにより、専門外の使用者に対しても正常な動作が期待できる。こ のような目的に対しGUIによる操作は適しており、このことは、先行研究で開発された NPRIM コードの設計思想とも合致していると思われる。NPRIM コードは NJOY コードを内蔵しその 利便性を高めた GUI システムとして開発された。本研究では、このような方針の元で、照射損 傷の評価を必要とする研究者が評価済み核データを用い、簡便に DPA を評価できるシステム を整備する。

3.1 NPRIM コードの機能と本研究の DPA 評価法の機能

NPRIM の特徴は以下のようなものである。

- ① NJOY コードをソルバーに持つ。
- ② 640 群構造の DPA 断面積を評価する。
- ③ 任意の群数の中性子束を 640 群に内挿する。
- ④ GUI による操作ができる。(OS は Windows と Mac に対応)

①に関しては、本研究でも同様に NJOY コードを利用するものとする。②に関しては、DPA 評価法が ASTM 規格において定義されており、その評価法では SAND-II コード ®で用いられ る 640 群構造を採用しているためである。一方で、核設計コードの詳細群でも、100 群程度で 十分とされることが多く、エネルギー自己遮蔽効果を考慮するための超詳細群計算では 1 万群 以上の計算を必要とする。つまり、この 640 群構造により自己遮蔽効果を考慮することは困難 であるとともに、このような詳細なスペクトルを供給できる核設計コードは存在しないという 状況にある。そのため、NPRIM コードでは、③に示されるように、任意の群数の中性子束を 640 群に内挿するものとしている。しかし、DPA 断面積などの評価は point wise データ(付録 B参照)で評価され、使用に合わせて group wise データに変更することを考えると、最初から 任意の群数の group wise データに出力したほうがよい。特に、任意の群数で与えられた中性子 束が統計誤差を持ち、その誤差の伝播を考える場合には任意の群数で処理したほうがよい。断面積のエネルギー縮約において、縮約スペクトルの整合がとれていれば、縮約後でも反応率は保存される。断面積処理に用いられる重みスペクトル自体は、任意の群数のスペクトルを内挿して用いる^{*1} ものとする。④に関しては、本研究でも同様のシステムを構築する。さらに、現在は、解析結果は表計算ソフト EXCEL により管理されることが一般的になってきており、入出力は EXCEL ファイルに集約するものとする。

結果として、本研究の DPA 評価法の機能は以下のようなものとする。

- ① NJOY コードをソルバーに持つ。
- ② 任意の群数の中性子束を内挿し重みスペクトルを生成する。
- ③ 任意の群数の DPA 断面積を評価する。
- ④ GUI による操作ができる。
- ⑤ 入出力は EXCEL ファイルを用いるものとする。

⑥ 中性子束が統計誤差を持つ場合はその評価 DPA に対する伝播を考慮できる。

3.2 開発コードによる処理と NJOY コードの入力ファイル

Fig.3.1 に、本研究で用いる NJOY コードの入力ファイルを示す。2 章では DPA 評価法について説明したが、断面積そのものの評価精度も重要であり、DPA 断面積及び評価 DPA の直接的な精度へとつながる。また、ユーザーにより、NJOY コードによる処理法が異なることもあり、本研究により採用した使用法に関しても明記しておく必要がある。なお、処理を行う研究者自身は自分の処理方法について知っておく必要がある。

評価済み核データは断面積が直接与えられるのではなく、関数形で与えられる。評価済み核 データの標準的な形式で本研究でも利用する ENDF-6 フォーマットでは、離散化点を与える形 式であるテーブル形式と、関数形を決めてパラメーターを与える形式の関数形式に分けられる。 テーブル形式はデータ点を直接与えているともいえるが、データ点の区間は関数により内挿さ れ、その関数形も複数用意され用いられている。関数形式に関しては、主に、共鳴ピークを表 現するために用いられ、ブライト・ウィグナー一準位公式など、共鳴ピークを解析的に表すこ とができる関数モデルと共鳴パラメーターにより与えられる。このように、核データそのもの を直接利用できるわけではない。初めに、RECONR モジュールにより、断面積を利用できる 直接的なデータ点であらわした point wise データを作成する。つぎに、BROADR モジュール によりドップラーブローデニングを行う。UNRESR モジュールでは非分離共鳴領域の共鳴断 面積を計算する。ここまでが、断面積の計算手順である。HEATR モジュールでは DPA 評価 のための損傷エネルギー断面積を計算する。最後に、GROUPR モジュールを用い、group wise 断面積を作成する。ここで、括弧書きの文字列は、プログラムにより、処理内容に応じた数値 に置換される。ここで、(temperature)は核種の温度を与え、ドップラーブローデニングに用い られる。(bg_cross_section)は背景断面積を与え、自己遮蔽効果を決定する。(weight)はユーザ ^{*1}当初は、NJOY のビルドインフラックス(maxwllian+1/E+fission)の使用を検討したが、高温 ガス炉体系の高いエネルギーのマックスウェルピークを考慮した入力には適用できず、適切な フラックスが得られないことがわかった。また、荒い縮約に対する精度も疑問視された。

ーにより与えられた任意の中性子束をスプラインカーブで内挿し重みスペクトルとして与えら れ、group wise 断面積作成に用いられる。なお、HEATR では(local)オプションの変更を可能 としている。このオプションは(n, γ)反応で発生したガンマ線のエネルギーを損傷エネルギー に加味するオプションである。NPRIM では同様の機能を SPECTER コード⁹⁾から移植してお り重要視している。本研究でも選択可能なものとした。

また、オリジナルの NJOY コードでは標準入力と標準出力を用いて制御する。この両者を同 時にリダイレクトするためには pipe コマンドが使え、UNIX 系 OS では、プロセスをコピーす る fork コマンドの使用により双方向 pipe の実現が可能であるが、Windows OS では fork コマ ンドが存在しないため実現できない。そのため、ファイルを経由して制御できるよう NJOY の 変更を行った。幸いにも、NJOY コードでは UPD と呼ばれる更新システムにより、差分を表 すパッチを充てることにより、プログラムの変更が行える。プログラムの変更を元に戻したい 場合にはパッチの適用を取りやめればよく、バージョン管理にも適したシステムである。標準 入出力をファイル入出力に変更するためのパッチを Fig. 3.2 に示す。

パッチの内容は、1 行目はパッチの適用名を示す。2 行目はコメント文を示し、3 行目は njoy モジュールのソースコードの 158 行目に挿入(insert)することを示している。4 行目、5 行目 は実際に挿入される文が記載されているが、Fortran では標準入力と標準出力として予約され ている5 番基盤と6番基盤に fort.5,fort.6 というファイルを指定しオープンすることにより、 ファイルを経由したアクセスを実現している。

この操作により、最終的に NJOY コードは fort.5 と tape31(31 番基盤、ENDF ファイル)を 入力とし、fort.6,output,tape29(29 番基盤、GENDF ファイル)を出力する。fort.5 は CASE.inp、 fort.6 は CASE.std_out、output は CASE.out、tape29 は CASE.gendf として出力フォルダー に保存される。また、GENDF ファイルから読みだされた演算された DPA 断面積等の演算結 果は CASE.xls に保存される。

なお、本開発により整備されたコードでは、式(2-2)を変形した以下のような値を評価するものとする。

$$DPA = \int_0^{t_i} \phi(t) dt \int_0^\infty \sigma_{DPA}(E) \varphi(E) dE \qquad (3-1)$$

$$DPA = Fluence \times DPA/s \qquad (3-2)$$

Fluence =
$$\int_{0}^{t_{i}} \phi(t) dt$$
 (3 - 3)

$$DPA/s = \int_0^\infty \sigma_{DPA}(E)\varphi(E)dE \qquad (3-4)$$

ここで、

φ(*t*):中性子束強度(-)

 $\varphi(E)$:単位中性子束(cm⁻²s⁻¹)

Fluence:中性子束強度の時間積分値(s)

DPA/s: 単位中性子束当たりのはじき出し率(dpa/s)

ここでは、中性子束を振幅関数と形状関数の積として表すものとし、振幅関数を無次元数と し、形状関数に単位を持たせている。これを逆にした場合は、Fluence は一般的な中性子束の 時間積分値の単位をもち、DPA/s は一群 DPA 断面積となる。値自体には変わりはないので、 用途によって読み替えればよい。本開発のコードでは、単位中性子束あたりのはじき出し率が 評価される。あとは、照射履歴を考慮したフルエンス^{*2}を掛け合わせれば、DPA が評価できる。 照射損傷を評価する際、あるエネルギー値以上の領域のフルエンスの関数^{*3} として与えられる ことが多い。これは、高速中性子束のみが照射損傷に支配的に寄与するためである。一方で、 本評価で定義するフルエンスは全エネルギー領域を対象としていることに留意すべきである。 なお、本研究では式(3-4)において中性子束に含まれる統計誤差を評価 DPA に伝播させる評価 も行う。

*³ASTEMのはじき出し損傷に関する文献 4)にはこのような用途に関する DPA の定義を以下のように明記されている。

dpa/s = $\overline{\sigma}_d(E > E_0) \times \phi(E > E_0)$

ここで、Eoとしては 0.01MeV が推奨されている。それでも、一群 DPA 断面積は炉型毎の炉内 スペクトルで縮約されたものであることには留意すべきである。

^{*2} フルエンスは中性子束(中性子フラックス)の時間積分したものにあたる。中性子フラック スはフルエンス率に相当する。

```
moder
    31
         -21
reconr
   -21
         -23
' 0.1% pendf for (nuclide_name) ' /
 (mat_no)
               0
                     0
                  0.0000 /
      0.0010
 0 /
broadr
   -21
         -23
              -24
                                   0.0000
  (mat_no)
               1
                     0
                           1
  0.00100
             1.00000E+06 /
 (temperature)
 0 /
 unresr
        -24
  -21
              -25
                     1
                          1
  (mat_no)
               1
  (temperature)
 (bg_cross_section)
 0 /
heatr
   -21
        -25
              -26
                     27
  (mat_no)
              1
                    0 0
                              (local)
                                       2/
   444
 groupr
   -21
         -26
                0
                     -28
              1
                          1
                                \mathbf{5}
                                   1 1 1
  (mat_no)
                    0
 '(nuclide_name) ' /
  (temperature)
  (bg_cross_section)
  (energy_group)
  (energy_group_structure)
  (weight)
  3 /
 0 /
0 /
 moder
   -28
          29
 stop
```

Fig.3.1 DPA 断面積評価のための NJOY 入力

*ident file

*/ njoy: change standard interface to file

*i njoy.158

open(nsysi, file='fort.5')

open(nsyse,file='fort.6')

3.3 GUI システムについて

NPRIM コードは GUI システムを備えているのみではなく、Windows OS 及び Mac OS にも 対応しており、マルチプラットフォーム環境での使用が可能である。本研究でもマルチプラッ トフォームでの使用は重要な機能であると考える。著者はこれまで、核燃料サイクル概念設計 コードシステム DAMOCLES を開発しており(付録 C を参照)、その GUI システムとして Gtkmm を採用している。Gtkmm は GTK+と呼ばれる C 言語による GUI ライブラリの C++ によるラッパーにあたる。DAMOCLES コードシステムのシステム自身及びそれに含まれるソ ルバーがオブジェクト指向言語 C++により記述されている。オブジェクト指向プログラミング を効率的に実現できるデザインパターンを駆使することにより、その可読性・再利用性を高め、 それぞれの核となるプログラムは階層的に管理され、それぞれのシステム・ソルバーの共通部 品として用いられる。NJOY コードを扱う本解析では、同様に NJOY コードを用いた ORIGEN ライブラリ作成ツール開発 10において整備されたプログラム群を用いて、そのソルバー部の開 発を最小限にとどめることができた。GUI システムに関しても既存のプログラム群が使用でき、 今回の開発により、システムの充実も図れた。C++で整備されたプログラム群はUNIX(Linux) OS での使用を想定しており、著者は Linux OS のひとつのディストリビューションである Fedora (今回の開発では Fedora 18) を選択した。Fedora は Linux OS の中でも先進的で開発 環境が充実している。Mingw と呼ばれるクロスコンパイル環境も充実しており、Windows OS 用のバイナリのコンパイルも可能である。Mingw は 32bit バイナリと 64bit バイナリの生成が 可能であり、Windows のそれぞれの環境で動作が可能な実行ファイルの生成が可能である。 現状において、原子力解析の開発環境の標準と言える UNIX 環境をベースとし、そのソースコ ードの一文も変えることなく、Mingw によるクロスコンパイルにより Windows OS 用の実行 ファイルの生成も可能である。

また、一般的に GUI プログラミングはその利便性を高めるために、Rapid Application Development (RAD)や特定の平易な言語(例えば Basic)に連結されていることが多い。RAD は、 GUI のパーツ(一部の開発環境ではウェジットと呼ばれる)の配置を視覚的かつ直観的に配置す ることが可能である一方で、特定の Integrated Development Environment (IDE)でのみ対応 できるものとなる。RAD で設計された情報は IDE のバージョンアップによりその互換性を失 うことが多々ある。また、連結されている言語とソルバーの記述言語が異なり管理が複雑とな る。さらに、複数の開発チームが共同で開発行う際に、これらの事情が災いし、ソルバーのソ ース文のみが公開され GUI 部のソースが引き渡されないなどの事情により、再利用が困難にな ったプログラムの存在を著者は確認している。この意味において、研究者自身がソルバーのみ ではなくシステムまでも整備できることが理想的であり、それに適したツールを選択する必要 がある。その意味で、GUI からソルバーまで統一的に扱える Gtkmm は効率的な研究開発に適 しているといえる。また、Gtkmm の元となる GTK+は Linux OS のシェルシステムである GNOME の基礎となり、Windows OS の Windows API に相当するものである。GTK+および Gtkmm はLinuxが廃れない限り廃れることはないものである。また、オープンなライセンス(付 録 E参照)であり、商用利用を含む、自由な利用が可能である。

ただし、オープンライセンスのライブラリの利用でも注意すべき点がある。オープンライセ

ンスの代表格である GPL ライセンスは感染型ライセンスとよばれ、GPL ライセンスのライブ ラリを組み込む際には、その組み込んだソフトウェアーの管理も GPL ライセンス化に置かれ なければならない。著者は開発されたプログラム群は最終的には完全なオープンソース化を目 指しているが、原子力研究という特殊な目的もあり、現段階では完全なオープンソース化は難 しい。しかし、Gtkmm は LGPL ライセンスであり、ライブラリの使用を行っても、ライセン スの感染はない。つまり、開発したプログラムの実行ファイルに関し、Gtkmm の使用調査を 目的としたリバースエンジニアリングは認められるものの、ソースコードを公開する義務はな い。同様に、本研究では、グラフ表示を行うための Plotmm、Excel ファイルの読み書きを行 うための ExcelFormat Library、マークアップ言語 YAML のパーサーである Yaml-Cpp を用い ているが、それぞれ、LGPL、CPOL、MIT License であり、使用にあたり、ソース公開など の義務は発生しない。Plotmm に関しては、Fedora OS の標準パッケージとして配布されてい る。今後の発展によっては、Gtkmm パッケージに統合されることも十分に考えられる。 ExcelFormat Libarry 及び Yaml-Cpp に関しては、ライセンス管理が緩やかであることもあり、 現在は、DAMOCLES コードシステム内でソースコード自体を管理している。これらのソース は著作権に関し明記すれば再配布をしても、ライセンス上の問題はない。

3.4 開発コードの検証

ASTM E693-01 には鉄及び低合金鋼の DPA 断面積の値が規格として定めている。その評価 値は ENDF/B-VI の評価済み核データおよび NJOY コードを用い、SAND-II コードで用いら れている 640 群のエネルギー群構造の DPA 断面積として整備されている。天然組成の鉄を対 象とし、⁵⁴Fe:5.9%、⁵⁶Fe:91.72%、⁵⁷Fe:2.1%、⁵⁸Fe:0.28%の割合で評価結果を合成している。

ASTM の DPA 断面積と本開発で開発した評価ツールによる DPA 断面積の比較結果を Fig. 3.3 に示す。なお、今回の解析には JENDL-4.0 を用いている。また、 (n, γ) 反応により発生 したガンマ線のエネルギーについては、ASTM の方法同様、考慮していない。



Fig. 3.3 本開発による DPA 断面積の ASTM E694-01 の DPA 断面積との比較結果

ー部、大きな差異も見られるが、ライブラリの差も含め DPA に大きく寄与する 1.0×10⁴ eV 以上の高エネルギー領域において差異が 10%以内に収まっており、よい一致が確認された。 1.0×10³ eV 付近に大きな差異がみられるが、先行研究 ³⁾でも JENDL3.2、JENDL3.3 間の比 較において同様の差異がみられている。JENDL の更新に際し、共鳴パラメーターが変更され たためとされており、このエネルギー領域の断面積はライブラリ間で評価が異なりやすいもの であると推測できる。しかし、この領域における DPA への寄与は無視できる程度である。

3.5 DPA 評価法の検討と今後の課題

先行研究の NPRIM コードでは、 (n, γ) 反応のガンマ線のエネルギーを重要視してきた経緯 があった。そのため、本研究においても、 (n, γ) 反応のガンマ線のエネルギーを局所付与でき るオプションを選択可能とした。その効果を確認するために、高温ガス炉(HTTR)の代表的な 炉心スペクトルを用い、炭素原子を対象に (n, γ) 反応のガンマ線のエネルギーの局所付与を行 った DPA の評価結果を Fig. 3.4 に示す。ガンマ線エネルギーの局所付与により 100eV 以下の 領域においては 13%程度の DPA 断面積の増加がみられ、エネルギーの局所付与の効果が確認 できた。一方で、100eV 以上では高エネルギー中性子による散乱反応によるはじき出しが主体 であるため、 (n, γ) 反応の寄与が少なくガンマ線エネルギーの局所付与の効果による DPA 断面 積の違いはほとんど見られず (0.01%以下) であり、最終的な DPA 評価に対する影響も無視で きる程度である。

一方で、核分裂反応に伴って発生するガンマ線のエネルギーの効果は PWR の圧力容器の内 側の DPA 評価に 1%程度の差が発生するとの報告がなされている¹¹⁾。このことから、炉内の燃 料要素に関しては、数%程度の誤差が発生していると推測される。今後は、ガンマ線輸送評価 手法およびガンマ線による DPA 評価手法を整備していく予定である。



Fig. 3.4 ガンマ線エネルギーの局所付与の効果

断面積の評価法に関しては、今回は無限希釈断面積を用いた。実効断面積は体系に依存する こと、DPA は共鳴の少ない高エネルギー領域が重要であること、ASTM 等でも体系に依存し ない DPA 断面積が整備・配布されていることなどを考えると、今回の評価手法で無限希釈断 面積を用いることは妥当である。しかし、炉心解析システムにおける一連の解析の中で、対象 を忠実に再現したモデルによる実効断面積および中性子束により DPA 評価がなされるべきで あり、システム化を行うことにより人為的ミスが介入する余地の排除も可能となる。今後は炉 心解析システム内での DPA 評価法の整備を行っていく予定である。

また、2章で述べたように、直接法を用いた DPA 評価手法の整備も課題である。

4. 結論

高温ガス炉の炉内材料の照射損傷評価法に関する研究開発を行った。先行研究で整備された NPRIM コードの機能を見直し、同等以上の機能を持つコードの整備を行った。さらに、照射 損傷評価の理論を確認し、評価法の検討を行った結果、今後の高精度化に関する課題が明らか になった。

開発コードの機能については以下のようなものである。

- ① NJOY コードをソルバーに持つ。(コードシステム内に NJOY コードを含む)
- ② 任意の群数の中性子束を内挿し重みスペクトルを生成する。
- ③ 任意の群数の DPA 断面積を評価する。
- ④ GUI による操作ができる。
- ⑤ 入出力は EXCEL ファイルを用いるものとする。
- ⑥ 中性子束が統計誤差を持つ場合はその評価 DPA に対する伝播を考慮できる。

なお、NJOY コードは DPA 断面積を評価するまでの機能を持ち、それ以外の処理は開発 コードシステムによって行われている。また、NPRIM コードでは 640 群のエネルギー群 に固定されていたが、本開発では任意の群数の処理が可能となっている。このことは、利 便性を高めるのみではなく、評価精度の観点からも適した処理法である。

照射損傷評価法の検討の結果、抽出された課題は以下のようなものである。

- ① (n,γ)反応で発生するガンマ線によるはじき出しは無視できるが、核分裂と同時に発生するガンマ線の影響は数%程度の影響があると推測される。ガンマ線輸送とガンマ線による DPA 評価手法の整備が望ましい。
- ②DPA評価に無限希釈断面積を用いること自体は、精度要求上問題はないが、炉心解析システム内において対象を忠実にモデル化して得られた実効断面積と中性子束を用いた評価がなされることが望ましい。
- ③現在、NJOY コードに用いられるエネルギーバランス法による評価は中重核評価での信頼性に欠ける。直接法を用いた手法の導入が望ましい。
- 今後は、これらの課題を解決できるよう研究開発を進めていく予定である。

謝 辞

本研究は材料照射に関する炉物理分野の専門家として活動されてきた島川聡司氏が実施する 予定であった研究テーマであり、島川氏は先行研究で用いられた NPRIM コードの開発者であ る。残念ながら、島川氏は本研究に取り組まれている最中、平成 25 年 10 月に志半ばで倒れら れた。本研究は故島川氏の遺志を引継ぎ完成されたものである。

また、本研究では、黒鉛材料特性のデータベース化を行っている同ユニットの角田淳弥氏、 WWR-K 炉での照射試験の経験のある照射試験炉センターの竹本紀之氏には、多くの有益な情 報をご提供いただきました。感謝いたします。

本研究の完成を以て、故島川氏への哀悼の意と替えさせていただきたい。

参考文献

- 1)柴田 大受,角田 淳弥,永田 寛 他: "高温ガス炉開発に関するカザフスタンとの協力研究,3; 高温ガス炉用耐酸化黒鉛材料の開発に関する協力,"日本原子力学会 2013 年秋の大会,八 戸,(2013).
- 2)R. E. MacFarlane and A. C. Kahler: "Methods for Processing ENDF/B-VII with NJOY," Nucl. Data Sheets, 111, (2010), pp. 2739-2890.
- 3)S. Shimakawa, N. Sekimura, N. Nojiri: "Radiation Damage Calculation by NPRIM Computer Code with JENDL3.3," Proceedings of the 2002 Symposium on Nuclear Data, JAERI-Conf 2003-006, (2003), pp. 283-288.
- 4)ASTM: "Standard Practice for Characterizing Neutron Exposures in Iron and Low Alloy Steels in Terms of Displacements Per Atom (DPA), E706(ID), " E693-01, (Reapproved 2007), ASTM, (2007), pp.223-230.
- 5)M. J. Norgett, M. T. Robinson, I. M. Torrens : "A Proposed Method of Calculating Displacement Dose Rates," Nucl. Eng. Des., 33, (1975), pp.50-54.
- 6)G. H. Kinchin, R. S. Pease: "The Displacement of Atoms in Solids by Radiation," Rep. Prog. Phys. 18, (1955).
- 7)真木 紘一,川崎 弘光,小迫 和明 他: "核発熱定数 KERMA ライブラリーの作成―核融合群定 数セット FUSION-J3 用核発熱定数ライブラリー―," JAERI-M 91-073, (1991), 101p.
- 8)W. N. McElroy, S. Berg, T. Crockett, "A Computer Automated Iterative Method for Neutron Flux Spectra Determined by Foil Activation," AFWL-TR-67-4, Vols 1-4, Air Force Weapon Laboratory, (1967).
- 9) L.R.Greenwood and R.K.Smither: "Nuclear Data for Radiation Damage Assessment and Related Safety Aspects," IAEA-TECDOC-263 (1985).
- 10)深谷 裕司,植田 祥平,後藤 実 他: "高温ガス炉設計のための核種生成消滅評価の研究," JAEA-Research 2013-035, (2013), 84p.
- 11)福谷 耕司,中田 早人,藤井 克彦,他: "PWR 原子炉容器内の放射線場評価," INSS Journal, 9, pp. 153-161, (2002).
- 12)H. Akima: "A New Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures," J. Assoc, Comput. Mach., 17, (1970), pp.589-602.

付録 A 照射損傷の理論及び評価法について

ここでは、照射損傷を評価する上で必要となる知識を深めるため、理論及び評価法の確認を 行う。

固体が放射線の照射を受けると性質が変化する。この現象を照射損傷という。固体中に入射 した放射線粒子は固体を構成する原子と衝突する。その際、原子に付与されるエネルギーがは じき出しエネルギーより大きな場合はその原子がはじき出される。この現象は、はじき出しと 呼ばれる。この場合、はじき出された原子は他の原子の格子間に移動し、格子間原子と呼ばれ る。また、原子の存在していた格子点は原子が不在となり空格子点と呼ばれる。この格子間原 子と空格子点の対はフレンケル対と呼ばれ、照射損傷という現象は放射線によりフレンケル対 のような格子欠陥が発生する現象と考えることができる。

放射線粒子によりはじき出された原子は Primary Knock-on Atom (PKA)と呼ばれる。はじ き出された PKA は同様に他の原子をはじき出すことがある。このような、はじき出し衝突の 連鎖を衝突カスケードと呼ぶ。照射損傷はターゲット原子あたりの PKA を含むはじきだされ た原子の総数で評価され、この数は Displacement Per Atom (DPA)と呼ばれる。

なお、原子炉内部における照射損傷は主に中性子照射により発生する。本研究では中性子照 射による損傷評価を行うものとする。

DPA 評価法は 2 章に示されたとおりであるが、はじき出し数ははじき出しエネルギーの 2 倍に反比例し、キンチン・ピースら ®によって示されている。紹介する。キンチン・ピースら は以下のようなモデルを提案した。

$$\nu(\mathbf{E}_{p}) = \begin{cases} 0, & 0 \le E_{p} < E_{d} \\ 1, & E_{d} \le E_{p} < 2E_{d} \\ E_{p}/2E_{d}, & 2E_{d} \le E_{p} < E_{I} \\ E_{I}/2E_{d}, & E_{I} \le E_{p} \end{cases}$$
(A-1)

ここで、

*E*_d:はじき出しエネルギー(eV)

E_l:イオン化の閾値エネルギー(eV)

PKAの反跳エネルギーがはじき出しエネルギーより小さければ、はじき出しは発生しない。は じき出しエネルギーより大きければ1原子のはじき出しが発生する。はじき出しエネルギーの 2倍までは原子のはじき出しは1個にとどまる。基本的に、はじき出し数は PKA の反跳エネ ルギーに比例する。この比例係数ははじき出し数1個の条件との連続性を考慮して決定される。 一方で、PKA のエネルギーが高い場合はそのエネルギーは電子励起およびイオン化に消費され、 はじき出しは起こらない。そのため、イオン化閾値エネルギー以上でははじき出し数は一定値 にとどまる。このように、キンチン・ピースモデルははじき出し損傷のメカニズムを直接的に 表している。一方で、この関数形を連続的かつ滑らかな曲線であらわすよう改良されたのが、 現在、一般的に用いられている NRT モデルである。

付録 B 断面積の種類及び性質

中性子と原子核の反応のしやすさを表す物理量として断面積という概念が用いられる。この 断面積は中性子の持つエネルギー及び反応により異なるが、実際の原子核の断面積(中性子の 入射ベクトルに垂直な平面への写像)が変化するわけではなく、その特性を表すために依存性 を持たせたものである。この断面積は物理現象に依存するのみではなく、特定の数値解法につ いて整備された概念もあり、改めて考え方および用語の確認を行う。

評価済み核データは無数のデータ点で供給されるのが一般的であり、このデータは point wise 断面積と呼ばれる。一方で、決定論手法の中性子輸送計算などでは、エネルギー群構造を 設定し、エネルギー群毎に支配方程式を解く。この際にはエネルギー群毎の断面積が必要であ り、このような断面積を group wise 断面積と呼ぶ。Fig. B.1 には U-235 の共鳴領域における 核分裂断面積が point wise 断面積と group wise 断面積で示されている。



Fig. B.1 point wise 断面積と group wise 断面積の比較(U-235 核分裂断面積)

矩形グラフで示されたものが group wise 断面積であり、それぞれのエネルギー領域で一定の値 が割り振られている。一つのエネルギー群に複数の共鳴ピークが含まれることがわかる。 group wise 断面積は point wise 断面積を縮約したものであり、炉心計算に直接利用できる形である ことから、炉定数と呼ばれることがある。縮約は中性子束の重みで断面積を平均化する操作で あり、中性子束の変化も平均化された断面積の値に影響を与える。特に共鳴ピークに対しては 中性子束の局所的な歪に起因するエネルギー自己遮蔽効果と呼ばれる効果が group wise 断面 積の値に大きな影響を与える。エネルギー自己遮蔽効果としては、燃料温度上昇による負の反応度効果として有名なドップラー効果がある。ドップラー効果とは温度変化に対するエネルギー自己遮蔽効果の変化を示す用語である。エネルギー自己遮蔽効果について Fig. B.2 に示した 模式図と共に説明する。ドップラー効果では、対象核種の熱運動により、中性子の運動エネル ギーが相対的に変化する。その影響によって共鳴ピークも相対的に幅が広がる(ドップラーブ ローデニング)。このこと自体は断面積の総量を増加させることには至らない。一方で、共鳴ピ ークが緩やかになった影響により、共鳴吸収による中性子束の歪みも小さくなる。この効果に より吸収反応率自体は増加し、負の反応度が発生する*4。また、背景断面積はある断面積の共 鳴ピークに注目した場合、その他の核種により与えられる影響の指標として定義されるもので あるが、均質体系における定義は以下のようになる。

$$\sigma_{0,n} = \frac{1}{N_n} \sum_{m \neq n} N_m \sigma_{t,m} \qquad (B-1)$$

均質体系における背景断面積は対象核種1核種当たりの他の核種の全断面積の合計値として定 義される。また、非均質体系における背景断面積は対象とする燃料塊からの中性子の漏えいを 考慮するための表面項と呼ばれるものが追加される。背景断面積とは、対象とする共鳴ピーク からの中性子の脱出確率を決定するための主要なパラメーターと考えられる。背景断面積が大 きい場合、つまり、対象核種以外の核種の影響が優勢の場合には、対象とする共鳴ピークの影 響が相対的に小さく中性子束の歪み具合に余り影響を与えない。もし、背景断面積を無限大ま で外挿出来れば、対象としている共鳴ピークの自己遮蔽効果は完全になくなる。このような断 面積を無限希釈断面積と呼ぶ。これは、文字通り、他の核種による無限希釈を意味している。 一方で、背景断面積が0の場合は自己遮蔽効果が最大となる。これを完全遮蔽断面積と呼ぶ。



Fig. B.2 エネルギー自己遮蔽効果の模式図

^{*4} 厳密にいえば、共鳴捕獲反応核種が多い場合である。共鳴をもつ核分裂性核種が多い場合は 逆に正の反応度が発生する。

上記のように自己遮蔽効果は共鳴エネルギー領域における局所的な中性子束の歪みの効果で あるが、group wise 断面積を用いる場合にはその効果を断面積の値で考慮するしかない。これ は、中性子輸送コード等では詳細群構造が 100 群程度であるが、このエネルギー群数をもって も中性子束の局所的な歪みは表現できない。このことは、Fig. B.1 からも明らかである。この ような効果は超詳細群減速計算を行うことで、局所的な中性子束の歪みを直接評価し、その結 果を用いて詳細群構造の group wise 断面積にその結果を反映させることができる。その際のエ ネルギー群数は数1万群程度となる。このように、自己遮蔽効果はこのような膨大なエネルギ 一群数により初めて直接的な表現ができるため、100 群程度のエネルギー群構造で断面積を表 現するためには、中性子束の歪みの効果である自己遮蔽効果は、そのエネルギー区間において 平均化された断面積として考慮するしかない。

このエネルギー自己遮蔽効果を断面積に補正を掛ける形で表現されたものが実効断面積と呼ばれるが、一般的に実効断面積は無限希釈断面積を自己遮蔽因子で補正する形で表す。

$$\sigma_{\rm eff} = \sigma_{\infty} f(\sigma_0, T) \tag{B-2}$$

自己遮蔽因子 f は、背景断面積 σ_0 及び温度 Tの関数として与えられる。このような自己遮蔽因 子と無限希釈断面積のセットをボンダレンコ型断面積と呼ぶ。

このように、group wise 断面積は微小領域における中性子束の歪を考慮した実効断面積であ り、そのパラメーターとしては、背景断面積及び温度であることがわかる。そのため、本解析 においても、背景断面積と温度はユーザーにより指定することができるようにインターフェー スが設計されている。また、今回は背景断面積を無限とした無限希釈断面積を用いる。Fig. B.1 に示すように、point wise 断面積として表現された共鳴ピークが group wise 断面積のエネルギ 一境界を跨ぐこともあり、ドップラーブローデニングによる共鳴ピークの特定エネルギー群に 対する寄与が多少変化することはあるものの温度変化に対する無限希釈断面積の変化は無視で きる程度であると考えられる。すなわち、背景断面積を無限大に設定する限りは温度設定に注 意を払う必要がないといえる。

付録 C DAMOCLES コードシステムについて

DAMOCLES(DynAmic Mass balance calculation cOde for nuclear fuel CycLES) $\exists - \exists t d$ 核燃料サイクル概念構築のためのサイクル諸量を目的としたプラットフォームシステムであり、 現在開発中である。その目的としては、特定の核燃料サイクルに対する核燃料物質、放射性廃 棄物等の物量の評価、毒性の評価、経済性の評価、及びそれらの評価に関連する原子炉設計、 その他核燃料サイクルに必要なプラントの設計などが対象となる。コードシステム自体はオブ ジェクト指向言語 C++を用いデザインパターンを用いた可読性が高く再利用可能なコーディ ングがなされている。各ソルバーに利用されるクラスは汎用化され、共有が可能となっており、 解析コードを作成するため、もしくは、作成したコードを連成するためのプラットフォームと しても位置付けられる。現在、多くの連成解析を必要とする分野に関しては、このようなプラ ットフォームを利用することが主流である。原子力においても例外ではなくフランスではフラ ンス原子力庁 CEA、フランス電力公社 EDF が中心となり、SALOME と呼ばれるプラットフ ォームを C++言語を用い作成している。利用される分野は原子炉物理、構造力学、熱流体力学、 核燃料物理額、材料科学、放射性廃棄物シミュレーションなど多分野にわたる。一方で、 DAMOCLES コードも多岐にわたる分野を念頭においているが、開発は主に概念設計に集中し 核燃料サイクルシステム全体の特性を評価できる様、シンプルかつコンパクトなシステム設計 を行っている。解析の実行も端末のみで完結するものが望ましい。なお、一部のプラットフォ ーム概念にはシステム自体をスクリプト言語で作成されているものがあるが、実行速度の遅さ、 型を定義しないことによる不確定さ・不明瞭さは否めない。この観点から、DAMOCLES コー ドではシステム部には信頼性を低下させるスクリプト言語は用いないものとする。一般的に、 科学技術は軍事技術により牽引されることが多く、軍事技術には高い信頼性を持つ技術が要求 される。この観点から、アメリカ国防省により Ada と呼ばれる堅牢さを重視したプログラミン グ言語が開発され利用されてきた経緯がある。しかし、最新の戦闘機である F-35 のファーム ウェアは C++ (コーディング規約として JSF++を合わせて開発) で開発されている。このこと は、Ada 言語が廃れ、C++言語がとってかわったものと理解できる。この背景として C++の有 用性及び、コーディング規約を整備すれば十分に高い信頼性が得られるとの評価が得られたと いう事情があると思われる。このように、C++言語により構築されたシステムは信頼性が高い ものといえる。

オブジェクト指向プログラミングの一例として、物量評価に用いられる基本的なコンテナク ラスである Inventory クラスとそれに関連する Nuclide クラスに関し説明する。Inventory ク ラスは、核種毎の物量を格納するためのコンテナとして設計されている。模式図を Fig. C.1 に 示す。それぞれ、核種を表す Nuclide クラスに対応さした値が格納されている。値は、Nuclide クラスオブジェクトを引数とする set メソドで追加が出来、get メソドで値を取出すことがで きる。FORTRAN などの一般的な手続き型言語では配列に核種を区別するための ID と値を格 納し、この2つの配列を比較することにより同等の機能が達成出来るが、C++(std::map コン テナを使用)では、クラスを直接引数とするコンテナを簡単に定義でき、模擬したい現象やシス テムの関連性をそのままコーディングすることが簡単な仕様となっている。



Fig. C.1 Inventory クラスの模式図



Fig. C.2 Nuclide クラスの模式図

一方で、引数となっている Nuclide クラスは Fig. C.2 の模式図に示されるように、核種の個体 情報(U-235等)を持つだけではなく、原子番号、質量数の取出し、比較演算、等の機能を持 つ。また、核種の表現自体は解析コード間で多様な表現がなされるが、この Nuclide クラスの 多様な機能により、これらの相違を吸収することが可能である。また、ReactionType クラス を通して、崩壊後の娘核種の決定や、それをさらに発展させた燃焼解析に必要な、遷移行列の 生成などへの拡張も容易である。

このように、DAMOCLES コードシステムをソルバー開発のプラットフォームとも考える ことができ、ソルバー開発自体が共通部分を DAMOCLES システムに反映させることにより、 DAMOCLES コードシステムの強化にもつながる。DAMOCLES コードシステムでは階層的な プログラム管理がされており、以下の様な構造となっている。

```
damocles---capsule (既存のプログラムのカプセル化(実行、入出力制御))
              |--- corebn
              |---endf
              |---mvp
              |---njoy
              |---origen
              |---srac
              |---temdim
              l--util
                     (物性値等のデータベース)
        |---database
              |---httr_data
              |--thermal_property
        |---model(現象・システムを模擬するためのモデル、基本的な部品)
              |--burnup
              |--geometry
              |--graphic
              |--mass_balance
              |--material
              |--graphic
              |--mass balance
              |--material
              |--quantity
              |--reactor core
        |---sandbox (試作品)
        |---solver(解析コード)
          |---algebra
           |---core_calculation
           |--graphic_raytracer
           |--mass_balance
           |--point_calculation
           |--point_kinetics
           |--space_calculation
           |--srac_cross_section
           |--thermal_hydraulics
        |---system (SQL データベース、GUI システム等)
           |--database
           |--excel
           |--gui
```

|--multimedia |--process |--xml |--yaml |---util

現時点では、ORIGEN ライブラリ作成ツール¹⁰⁾などが実用化されている。

付録 D 開発コードの使用法について

本研究で開発した DPA Calculatorについての概要と使 用法について説明する。入力フ ァイルとしては、ENDFフォー マットの評価済み核データファ イルと代表スペクトルを格納し た Excel ファイルである。評価 済み核データファイルは整備し ている各国からインターネット を通じ入手できる。

Excel ファイルは Fig. D.1 に
示 す よ う に 、 シ ー ト 名
は "energy_group_and_flux" と
し、エネルギー群番号、エネル
ギーの上限、下限、中性子束、
中性子束の統計誤差(%)(誤差が
発生しない手法ではゼロを記載)
を入力する。

DPA Calculator の GUI の概要を Fig. D.2 に示す。大きく分けて、上 部の View Panel と下部の Control Panel から成る。Control Panel に より必要な設定を行い、その解析結 果が View Panel に反映される。

Control Panel は Flux Panel, Configuration Panel, Calculation Panelから成る。

初めに、Flux Panel で、Set Path ボタンを押し、ファイルチューザー を用い、代表フラックスの入力され Excel ファイルを選択する。

次に、Configuration Panel の設 定を確認する。Fig. D.3 にその外観 を示す。デフォルトでは、実行ファ イルと同じディレクトリに NJOY の実行ファイル、出力フォルダー、

XI .	5.0.1						io.xls []	互換モード]
ファイル	レーム 挿	入 ページ レイアウト	数式 データ 校閲	表示				
	👗 切り取り	MS Pゴシック	- 11 - A A	= = >-	➡ 折り返して全	体を表示する	標準	
貼り付け	, ¹ 12 コピー・	B I U -		= = = = = =	豆 セルを結合し	て中央揃え、	- %	• •0
	クリップボード	5	フォント 5		配置	Fa	素な	友値
A.1		×						
AI		Jx gro	oup number					
4	A	В	C	D	E	F	G	H
1 gr	oup number	upper boundary (eV)	lower boundary (eV)	flux (#/cm2/s)	error (%)			
2	1	2.0000E+0	07 1.0000E+0	7 6.05382E-05	7.12000E+00			
3	2	1.0000E+0	07 7.7880E+0	6 2.30217E-04	4.21200E+00			
4	3	7.7880E+0	06 6.0653E+0	6 9.82619E-04	2.28700E+00			
5	4	6.0653E+0	06 4.7237E+0	6 2.44584E-03	1.36800E+00			
6	5	4.7237E+0)6 3.6788E+0	6 3.73585E-03	8.34000E-01			
7	6	3.6788E+0)6 2.8651 E+0	6 4.79731E-03	7.23000E-01			
8	7	2.8651 E+0)6 2.2313E+0	6 8.96815E-03	5.93000E-01			
9	8	2.2313E+0)6 1.7377E+0	6 1.25198E-02	3.95000E-01			
10	9	1.7377E+0	06 1.3534E+0	6 1.45921E-02	3.46000E-01			
11	10	1.3534E+0	06 1.0540E+0	6 1.50954E-02	2.99000E-01			
12	11	1.0540E+0	06 8.2085E+0	5 1.49748E-02	3.06000E-01			
13	12	8.2085E+0	05 6.3928E+0	5 1.46401E-02	2.42000E-01			
14	13	6.3928E+0	05 4.9787E+0	5 1.41473E-02	2.31000E-01			
15	14	4.9787E+0	3.8774E+0	5 1.34965E-02	2.63000E-01			
16	15	3.8774E+0	3.0197E+0	5 1.30337E-02	2.58000E-01			
17	16	3.0197E+0	05 2.3518E+0	5 1.25774E-02	2.19000E-01			
18	17	2.3518E+0	05 1.8316E+0	5 1.21496E-02	2.14000E-01			
19	18	1.8316E+0	05 1.4264E+0	5 1.17176E-02	2.66000E-01			
20	19	1.4264E+0	5 1.1109E+0	5 1.15600E-02	2.35000E-01			
21	20	1.1109E+0	05 8.6517E+0	4 1.13146E-02	2.28000E-01			
22	21	8.6517E+0	04 6.7380E+0	4 1.11089E-02	2.10000E-01			
23	22	6.7380E+0	04 5.2475E+0	4 1.09240E-02	2.28000E-01			
24	23	5.2475E+0	4.0868E+0	4 1.08637E-02	2.22000E-01			
25	24	4.0868E+0	04 3.1828E+0	4 1.07607E-02	2.39000E-01			
26	25	3.1828E+0)4 2.4788E+0	4 1.06387E-02	2.14000E-01			
27	26	2.4788E+0)4 1.9305E+0	4 1.06121E-02	2.30000E-01			
28	27	1.9305E+0)4 1.5034E+0	4 1.05296E-02	2.20000E-01			
29	28	1.5034E+0	4 1.1709E+0	4 1.04403E-02	2.55000E-01			
30	29	1 1709E+0	9 1188E+0	3 1.04152E-02	2 43000E-01			
31	30	9 1188E+0	3 7 1017E+0	3 1.04464E-02	1 99000E-01			
32	31	7.1017E+0	3 5308E+0	3 1.04147E-02	2.16000E-01			
33	32	5.5308E+0	3 4.3074E+0	3 1.03744E-02	2.27000E-01			
	energ	v group and flux						

Fig. D.1 入力ファイルの概要



Fig. D.2 GUI の概要

Fig. 3.1 に示した NJOY のベースインプットファイルのパスが設定される。変更が必要な場合 はここで変更する。

-	/home/fukaya/work/damocles/application/dpa_calculator/njoy.exe	Set Path
Output Direc	tory Path	
	/home/fukaya/work/damocles/application/dpa_calculator/output	Set Path
NJOY base in	put path	
	/home/fukaya/work/damocles/application/dpa_calculator/njoy_base.inp	Set Path

Fig. D.3 Configuration Panel

最後に Fig. D.4 に示す Calculation Panel にて計算に必要な設定を行い、DPA の計算を行う。 初めに Set Path ボタンを押し、ENDF ファイルの選択を行う。Use nuclide name as case name のオプションが選択されている場合には、選ばれた ENDF ファイルより核種名が読み込まれ、

1	lone	Set Path	Use nuclide name	as case name: 🛛 🧭	
Condition Case Name (without space): Default Attach gamma energy to local: 💞					
lemperatu	re (K): 300.0		Background Cro	ss Section (bam): 1.0E+10	
			Calculate		

Fig. D.4 Calculation Panel

自動的に解析ケース名に割り当てられる。当然、核種名と独立にケース名を設定することも可 能である。解析条件としては、(n,γ)反応により発生したガンマ線のエネルギーを損傷エネル ギーに付加するか否か、ドップラーブローデニングに用いる温度、自己遮蔽効果を決定するた めの背景断面積を設定し、Calculate ボタンを押し解析を実行する。背景断面積はデフォルト で 1.0×10¹⁰ barn の値が設定されているが、実質的に無限大の値である。背景断面積を無限大 に設定した時の実効断面積は無限希釈断面積と呼ばれる。NPRIM と同様、本研究でも無限希 釈断面積を用いるものとする。無限希釈断面積は自己遮蔽効果が発生しないため、ドップラー ブローデニングの効果は期待できない。無限希釈断面積と併用する際、温度設定は大まかな値 でもよいと思われる。

出力結果を Fig. D.5 に示す。この評価は HTTR の代表スペクトルを用いて、⁵⁶Fe の DPA 断 面積及び DPA を評価したものである。同様の結果は Excel ファイルにも出力される。Excel

ファイルには NJOY コードで重みスペクトルとして用いられた中性子束も出力される。もし、 予期しない結果が得られた場合は、その中性子束が意図したものと合致しているか確認するこ とが、解析が正しく行われかを判断する上で重要になる^{*5}と思われる。



*5 本開発のコードはユーザーが与えた中性子束を十分に滑らかになるようにスプライン内挿に より、合成しNJOY コードに渡している。一部のスプライン内挿では、2回微分までの連続性 を担保するが、この処置が特定の条件下において明らかに異なる内挿を実現することが問題視 されている。本開発では、この点に優れた秋間法 120を採用しており、問題は発生しにくい。

付録 E プログラムのライセンスについて

多様な機能を持つプログラムを実現するには、既存のプログラムの利用は避けられない。こ の時は、利用したプログラムの著作権を尊重すること、不当に著作権を侵害しないように注意 を払う必要がある。一方で、既存のプログラムを自身のプログラムに組み込んだ場合には、自 身のプログラムと共に再配布できなければ、利用者の利便性を損ねることになる。しかし、こ のような行為は意図しないところで、著作権を侵害する結果も招きかねない。一般的に、公開 コードはライセンスによりその権利が保護されており、ユーザーはそのプログラムを利用する 以上、ライセンスにより定められた条件、制約に従わなければならない。プログラムのライセ ンスは複数あり、複雑である。また、その条件が誤解されているライセンスも多くあり、プロ グラムの利用者はそれらの性質を知っておく必要がある。

扱いが難しく、比較的誤用を招きやすいライセンスに GNU General Public License (GPL) がある。GNU は科学計算のデファクトスタンダードともいえる、UNIX 環境を構成するプロ グラム群の多くが該当し、GPL の元、権利が保護されている。科学計算を行う以上 GPL に示 された条件に従う機会が多いが、この GPL ライセンスは感染型ライセンスとよばれ、その扱 いが難しいものの一つである。GPL ライセンスに従うプログラムを利用する際は、利用する側 (呼び出し側)のプログラムも GPL ライセンスに従わなければならない。GPL は多くの人々 に自由に使われることを目的として作られたライセンスであり、GPL ライセンスを用いる以上、 用いたプログラムも公開されなければならない。

科学計算を行う際には、組み込み関数のみでは十分な演算が実現できず、新たな関数や演算 ルーチンなどを整備する必要に迫られることが多い。しかし、その処理内容がプログラム作成 の目的である特定の問題に限られたものではない場合、科学計算ライブラリを用いることによ りプログラムの開発を最小限に抑えることができる。GNUの科学計算ライブラリとして GNU Scientific Library があり、多くの機能が提供されている。しかし、GNU Scientific Library は GPL ライセンスに従うため、GPL ライセンスの内容を理解せずに使用した場合には、思わぬ ところでプログラム公開の義務が発生することとなる。

このような状況を回避するために作られたライセンスが Lesser General Public License (LGPL)である。以前は Library GPL と呼ばれていたこともあり、ライブラリとして利用する 際に、利用側が過度の制約を受けないように整備されたものである。たとえば、LGPL 下のラ イブラリ A にリンクされる可能性のあるプログラム B のソースコードには LGPL は適用され ない。ライブラリ A にリンクしたプログラム B はリバースエンジニアリングを禁じることがで きない。ライブラリ A にりンクしたプログラム B な配布する場合はソースコードも配布 される必要がある。このように、LGPL は使用状況を調査する目的において、その使われ方に 応じ段階的に、制約が発生する。たとえば、GUI ライブラリに GTK+というものがある。この プログラムは LGPL に従う。GUI ライブラリの目的上、コマンドラインプログラムを GUI 化 するだけでソースコードを公開しなければならないというのは非常に不都合である。このライ ブラリを使用する場合、作成したプログラムのソースコードを配布する場合は、ライセンスを 一切気にする必要がない。もし、コンパイルしたバイナリーファイルを配布する場合には、ユ ーザーがリンクしたライブラリを含む GTK+のランタイムを独自に入手し使用する場合には、 配布したバイナリ - ファイルがリバースエンジニアリングを受けることを承諾するのみでよい。 GNU Scientific Library が LGPL ではなく、GPL ライセンスを選択していることから、GNU Scientific Library が GNU の発展のみを視野に入れているという意思が推測できる。

その他、本研究で使用したプログラムのライセンスに関し説明する。Code Project Open License (CPOL)はプログラム投稿サイトの Code Project に投稿されるプログラムのライセン スである。その内容としては、ソースコード及び実行ファイルの商用利用及び再配布ができ、 改良も自由であるというものである。ただし、プログラム使用において問題が発生しても著作 者に責任はないというものである。

MIT License も同様に制約が少ないライセンスである。プログラムの使用自体は無償・無制限である。ただし、著作権教示及びライセンスの許諾表示を明記する必要がある。なお、著作者はプログラムに関しなんら責任を負わないというものである。

このように、ライセンスにより権利が守られながらも、使用者に対し過度な制約が発生しな いものもあり、開発者は自分の作成しているプログラムの性質に応じて利用するライブラリ等 を適切に選択する必要がある。

最後に、比較的頻繁に議論がなされる GNU コンパイラ(gcc, g77 等)によりコンパイルされた 実行ファイルおよびそのソースファイルに対して、GPL ライセンスが感染するか否かについて 言及する。プログラムがコンパイルされると標準ライブラリにリンクされる。このリンクが問 題ではないかという点が論点となる。しかし、これらの標準ライブラリはライセンス汚染が発 生しないように例外条項が付帯した GPL ライセンスとなっており、ユーザー自身がライブラ リを配布しない限りは制約を受けることはない。一方で、脱 GPL 化の動きもあり、UNIX 系 OS の一つである FreeBSD は GPL ライセンスの C++標準ライブラリである libstdc++の代わ りに、LLVM の libc++に移行した。

このような状況から、プログラムライセンスや使用するプログラムの開発の状況を考慮して 自身のプログラムを開発するには、できるだけコンパイラ依存の記述やライブラリのインター フェースの直接の利用は避けたほうがよいと言える。 This is a blank page.

表 1. SI 基本単位						
甘大昌	SI 基本単位					
盔半里	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	Α				
熱力学温度	ケルビン	Κ				
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					
和立事	SI 基本単位				
和立里	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 数每	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+	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 ⁸			
質量濃度キ	ログラム毎立法メートル	kg/m ³			
輝 度力	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 concentra	ation)は臨床化学の分野では	物質濃度			
(substance concentration) ともよげれろ					

(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

	SI 旭立単位				
組立量	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 隹	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m	
立 体 催	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	Ν		m kg s ⁻²	
压力,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	С		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	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$	
磁床	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$	
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$\text{kg s}^{2} \text{A}^{1}$	
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$	
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K	
光東	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	$m^2 s^{\cdot 2}$	
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol	

酸素活性(カタール kat state)
 [s¹ 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。
 (a)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、ペラレルは抜焼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、セルシウス湿度を表すために使用される。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、100%で温度関係を対象値はどちらの単位であても同じである。
 (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

	SI 組立単位			
組立量	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	
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²	
表 面 張 九	リ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 辛	「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}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	с	
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10 ⁻⁶	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10 ⁻⁹	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р	
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f	
10^3	+ 1	k	10 ⁻¹⁸	アト	а	
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v	

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°=(п/180) rad				
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad				
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad				
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²				
リットル	L, 1	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm 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

衣される剱値が実験的に待られるもの								
名称				記号	SI 単位で表される数値			
電	子 オ	ベル	ŀ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J			
ダ	ル	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg			
統-	一原子	質量単	单位	u	1u=1 Da			
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 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 ⁵ Pa
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	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})2=10^{-28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーバ	Np	の単位しの数位的な間接け
ベル	В	対数量の定義に依存。
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	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx		
ガ ル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$		
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$		
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4π)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			
+	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq			
$\scriptstyle u$	\sim	トク	゛ン	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$			
ラ			K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy			
$\scriptstyle u$			ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv			
ガ		ン	7	γ	1 γ =1 nT=10-9T			
フ	T.	ル	"		1フェルミ=1 fm=10-15m			
メー	ートル	系カラ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg			
ŀ			ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa			
標	準	大复	(圧	atm	1 atm = 101 325 Pa			
力		IJ	_	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)			
3	カ	17	~		$1 = 1 = 10^{-6}$ m			