

チェレンコフ光観測の原子炉計測への適用 (3)

—チェレンコフ光評価システムの軽水炉用使用済燃料要素評価—

Application of Cherenkov Light Observation to Reactor Measurements (3)

- Evaluation of Spent Fuel Elements of LWRs with Cherenkov Light Estimation System -

山本 圭一 武内 伴照 林 隆康 小菅 史明

土谷 邦彦

Keiichi YAMAMOTO, Tomoaki TAKEUCHI, Takayasu HAYASHI, Fumiaki KOSUGE
and Kunihiko TSUCHIYA

原子力科学研究部門

大洗研究開発センター

照射試験炉センター

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center

Oarai Research and Development Center

Sector of Nuclear Science Research

November 2016

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 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
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, 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

チェレンコフ光観測の原子炉計測への適用(3)
—チェレンコフ光評価システムの軽水炉用使用済燃料要素評価—

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門
大洗研究開発センター 照射試験炉センター

山本 圭一^{※1}、武内 伴照、林 隆康^{*1}、小菅 史明^{*1}、土谷 邦彦

(2016 年 9 月 28 日受理)

原子炉出力変化時におけるチェレンコフ光の輝度などの変化を定量的に測定及び評価し、原子炉内の核的・熱的情報をリアルタイムで計測が可能なシステムを構築するための開発を行っている。本システムは、既存軽水炉における運転管理技術・炉心計画の高度化及びシビアアクシデント時にも対応できる監視システムへの適用を目指している。本報告書は、JAEA-Testing 2015-001で記載したチェレンコフ光評価システムを改良し、改良したシステムを用いて、発電用原子炉の使用済燃料要素についての検証を行った結果についてまとめたものである。

大洗研究開発センター：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

※1 特定課題推進員

*1 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

Application of Cherenkov Light Observation to Reactor Measurements (3) - Evaluation of Spent Fuel Elements of LWRs with Cherenkov Light Estimation System -

Keiichi YAMAMOTO^{※1}, Tomoaki TAKEUCHI, Takayasu HAYASHI^{*1}, Fumiaki KOSUGE^{*1}
and Kunihiko TSUCHIYA

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center
Sector of Nuclear Science Research
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received September 28, 2016)

Development of the reactor measurement system has been carried out to obtain the real-time in-core nuclear and thermal information, where the quantitative measurement of brightness of Cherenkov light was investigated. The system would be applied as a monitoring system in severe accidents and for the advanced operation management technology in existing LWRs. This report summarized the modification of Cherenkov light estimation system described JAEA-Testing 2015-001 and the result of the burn-up evaluation by Cherenkov light image emitted from spent fuel elements of LWRs with the modified system.

Keywords: Reactor Measurement, Cherenkov Light Estimation System, Burn-up, Spent Fuel Elements of LWRs

※ 1 Special Topic Researcher

* 1 ITOCHU Techno-Solutions Corporation

目 次

1. はじめに	1
2. チェレンコフ光評価システムの改良	1
2.1. 概要	1
2.2. 画面構成	1
2.3. 機能	2
2.3.1. チェレンコフ光観測画像の取得	2
2.3.2. 変換係数の作成	3
2.3.3. チェレンコフ光観測画像解析	3
2.3.4. 結果の表示及び出力	3
3. 使用済燃料集合体の燃焼度推定用データベース	12
3.1. 概要	12
3.2. データベースの作成フロー及び構成	12
3.3. チェレンコフ光子数テーブルの作成	12
3.4. 変換係数	12
4. チェレンコフ光評価システムの検証試験	18
4.1. チェレンコフ光観測画像を用いた検証	18
5. まとめ	24
謝 辞	24
参考文献	25

Contents

1. Introduction.....	1
2. Design of Cherenkov Light Estimation System	1
2. 1. Outline.....	1
2. 2. Construction of Image	1
2. 3. Function of System	2
2. 3. 1. Acquisition of Cherenkov Light Image	2
2. 3. 2. Preparation of Conversion Coefficient.....	3
2. 3. 3. Estimation of Cherenkov Light Image	3
2. 3. 4. Indication and Output of Results.....	3
3. Database of Thermal Power Evaluation in Fuel Elements	12
3. 1. Outline.....	12
3. 2. Configuration of the Database	12
3. 3. Preparation of Cherenkov Light Intensity	12
3. 4. Conversion Coefficient.....	12
4. Verification Tests of Cherenkov Light Estimation System	18
4. 1. Verification of Cherenkov Light Image.....	18
5. Conclusion	24
Acknowledgment.....	24
References	25

1. はじめに

東日本大震災で発生した大津波による東京電力福島第一原子力発電所(以下、福島第一原発)の全電源喪失により、原子炉と格納容器の計装系が十分に機能せず、事故時に必要な原子炉冷却水の水位、温度等の測定データを的確に収集することが困難であった^[1]。このため、福島第一原発の事故からの早期復旧・復興も含め、さらなる原子力安全のための技術基盤の確保・充実を行い、日本の電力安定供給に向けて既存原発の安全性高度化を推進することが要求されている^[2-4]。

本報告書は、JAEA-Testing 2015-001(チェレンコフ光観測の原子炉計測への適用(2))^[5]で設計・試作したシステムを改良し、発電用原子炉の使用済燃料集合体の監視を行えるチェレンコフ光評価システムとし、冷却期間及び燃焼度が既知の BWR 用使用済燃料集合体の観測画像を用いて動作検証を行った結果について報告する。

2. チェレンコフ光評価システムの改良

2.1. 概要

参考文献^[5]で設計・試作したシステムに以下の機能を追加し、発電用原子炉の使用済燃料集合体の監視を行えるチェレンコフ光評価システムとした。本システムの概要を図 2-1 に示す。

- ・ チェレンコフ光観測画像の取得機能
- ・ 変換係数の作成機能
- ・ 燃焼度推定機能(ビデオ再生モード、カメラキャプチャモード、静止画モード)
- ・ 燃焼度推定結果の表示機能

2.2. 画面構成

改良したチェレンコフ光評価システムは、参考文献^[5]のプログラムに静止画像解析画面、変換係数作成画面を追加したプログラムで構成されている。本評価プログラムの画面構成を図 2-2 に示す。本評価プログラムでは以下の評価方法を選ぶことができる。

評価①：ビデオ再生モード(図 2-3)

評価②：カメラキャプチャモード(図 2-4)

評価③：静止画モード(図 2-5)

※：上記評価の画面遷移図の凡例は図 2-6 に示す。

評価①に関しては、参考文献^[5]の評価方法に下記の 3. と 4. の手順を追加することで、チェレンコフ光観測時に取得した動画ファイルを用いてチェレンコフ光の画像情報から使用済燃料集合体の燃焼度の評価を行えるように改良した。

1. ビデオ選択ダイアログで動画ファイルを選択する。
2. メイン画面で選択した動画ファイルを再生する。
3. 対象となる原子炉の燃料集合体用の光子数テーブルを選択する。
4. 対象となる使用済燃料集合体の冷却期間及び変換係数を選択する。

5. 解析条件設定ダイアログで画像解析の条件を設定する。
6. 「開始」ボタンをクリックし、画像解析を開始する。(画像解析中は解析条件の参照のみ)
7. 画像解析結果をメイン画面及び解析結果表示ダイアログに表示する。
8. 「一時停止」ボタンをクリックし、動画再生及び画像解析を一時停止する。
9. 「終了」ボタン又は「停止」ボタンをクリックし、動画再生及び画像解析を終了する。
画像解析が終了すると解析結果が保存された CSV ファイルを出力する。

評価②に関しては、参考文献^[5]の評価方法に下記の 3. と 4. の手順を追加することで、本評価プログラムがインストールされた PC に接続されているビデオデバイスで撮影している映像を用いてチェレンコフ光の画像情報から使用済燃料集合体の燃焼度の評価を行えるように改良した。

1. デバイス選択ダイアログでビデオデバイスを選択する。
2. メイン画面にカメラで撮影中の画像を表示する。
3. 対象となる原子炉の燃料集合体用の光子数テーブルを選択する。
4. 対象となる使用済燃料集合体の冷却期間及び変換係数を選択する。
5. 解析条件設定ダイアログで画像解析の条件を設定する。
6. 「開始」ボタンをクリックし、画像解析を開始する。(画像解析中は解析条件の参照のみ)
7. 画像解析結果をメイン画面及び解析結果表示ダイアログに表示する。
8. 「終了」ボタンをクリックし、画像解析を終了する。画像解析が終了すると解析結果が保存された CSV ファイルを出力する。

評価③に関しては、本評価プログラムで新規に追加した評価方法であり、ビデオ再生時又はカメラキャプチャ時に取得した静止画ファイルを用いてチェレンコフ光の画像情報から使用済燃料集合体の燃焼度の評価を行う。

1. ファイル選択ダイアログで静止画像（ビットマップ）を選択する。
2. メイン画面に選択した静止画像を表示する。
3. 対象となる原子炉の燃料集合体用の光子数テーブルを選択する。
4. 対象となる使用済燃料集合体の冷却期間及び変換係数を選択する。
5. 解析条件設定ダイアログで画像解析の条件を設定する。
6. 「実行」ボタンをクリックし、画像解析を実行する。画像解析を実行すると解析結果が保存された CSV ファイルを出力する。
7. 画像解析結果をメイン画面に表示する。

2.3. 機能

2.3.1. チェレンコフ光観測画像の取得

画像解析専用画面上で「スナップショット」ボタンをクリックすると、再生している映像からチェレンコフ光画像(ビットマップ)が取得できる。映像信号は、チェレンコフ光観測時に取得した動画ファイル(AVI 形式)または PC に接続されたビデオデバイスから取得する。

2.3.2. 変換係数の作成

変換係数の作成画面を図 2-7 に、作成処理フローを図 2-8 に示す。変換係数の作成画面は、静止画像ファイル（ビットマップ）の選択機能、画像解析機能、及び新規作成した変換係数の計算結果の表示・保存機能を実現するユーザインターフェースを実装した。本機能を用いて、変換係数の新規作成、更新または削除が行える。

2.3.3. チェレンコフ光観測画像解析

使用済燃料集合体の燃焼度推定用データベースを使用し、画像解析機能により得られる輝度から使用済燃料集合体の燃焼度を推定する。燃焼度推定の対象となる使用済燃料集合体は、カメラキャプチャモードのメイン画面、ビデオ再生モードのメイン画面又は静止画モードのメイン画面に表示されている観測画像上で選択する。

2.3.4. 結果の表示及び出力

画像解析の結果をダイアログに表示する(図 2-9)。結果はサンプリング周期毎に追加され、以下の項目を表示する。本システムでは表示項目に使用済燃料集合体の燃焼度推定値を出力するように改良した。なお、カメラキャプチャモード時における撮影日時は、PC システム時刻より取得する。

- ・解析開始時からのビデオ再生時間(ビデオ再生モード時)、燃焼度推定日時(静止画モード時)あるいは撮影日時(カメラキャプチャモード時)
- ・輝度(補正なし)
- ・輝度(補正あり)
- ・使用済燃料集合体の燃焼度推定値

また、サンプリング周期毎に得られた画像解析の結果は、使用済燃料集合体の燃焼度の時間変化をグラフ化するため CSV ファイル(Excel®)に保存する(図 2-10)。CSV ファイルには、以下の機能を持たせることとする。なお、カメラキャプチャモード時における撮影日時は、PC システム時刻より取得する。

- A) CSV ファイルのヘッダには、以下の 6 項目を出力する。本システムでは出力する項目にチェレンコフ光観測画像の情報を燃焼度に変換する変換係数を追加した。
 - ・解析開始時タイムスタンプ(PC システム時刻)
 - ・解析終了時タイムスタンプ(ビデオ再生モード時又はカメラキャプチャモード時のみ)
 - ・解析実施時の解析周期(ビデオ再生モード時又はカメラキャプチャモード時のみ)
 - ・解析実施時の解析範囲(起点座標及び寸法)
 - ・輝度の補正係数(システム起動時に INI ファイルから読み込み)
 - ・変換係数
- B) CSV ファイルには解析開始時から解析終了時まで得られた全データを出力する。出力するデータは解析結果表示ダイアログと共通である。
- C) ファイル生成規則

参考文献^[5]のファイル生成規則と同様とする。

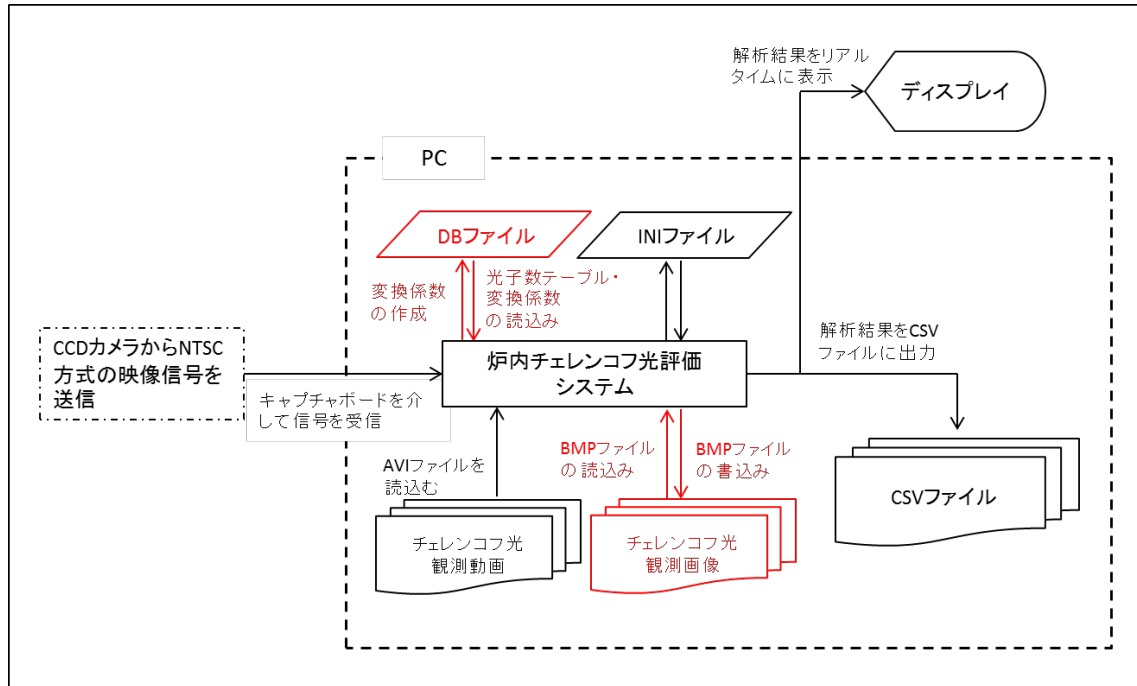


図 2-1 チェレンコフ光評価システムの概要

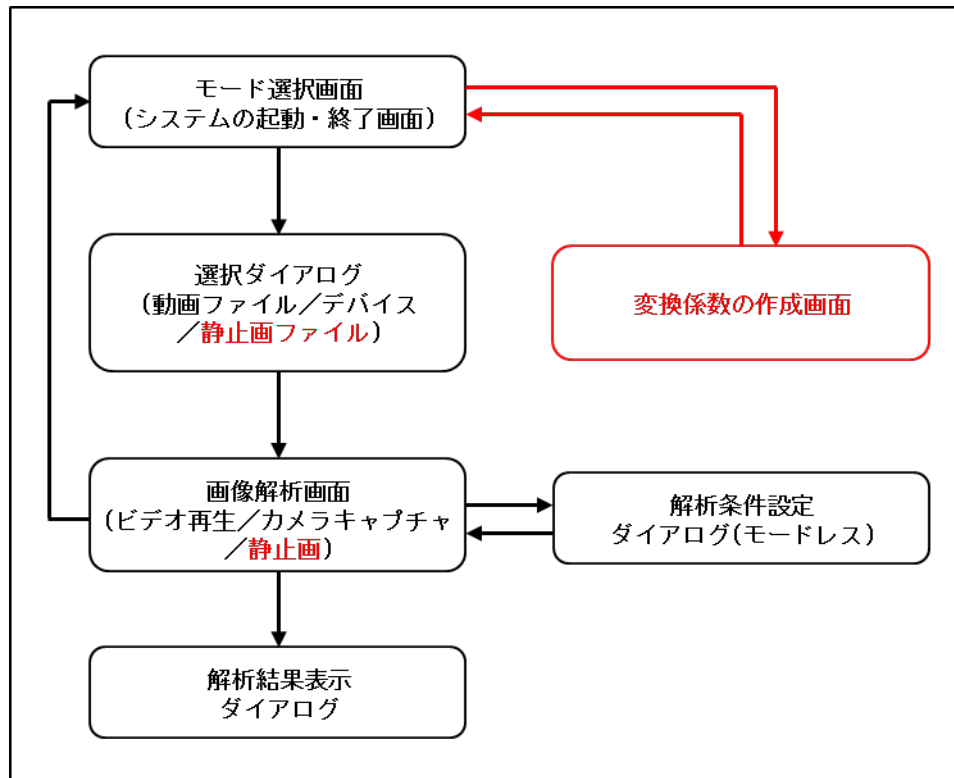


図 2-2 チェレンコフ光評価プログラムの画面構成



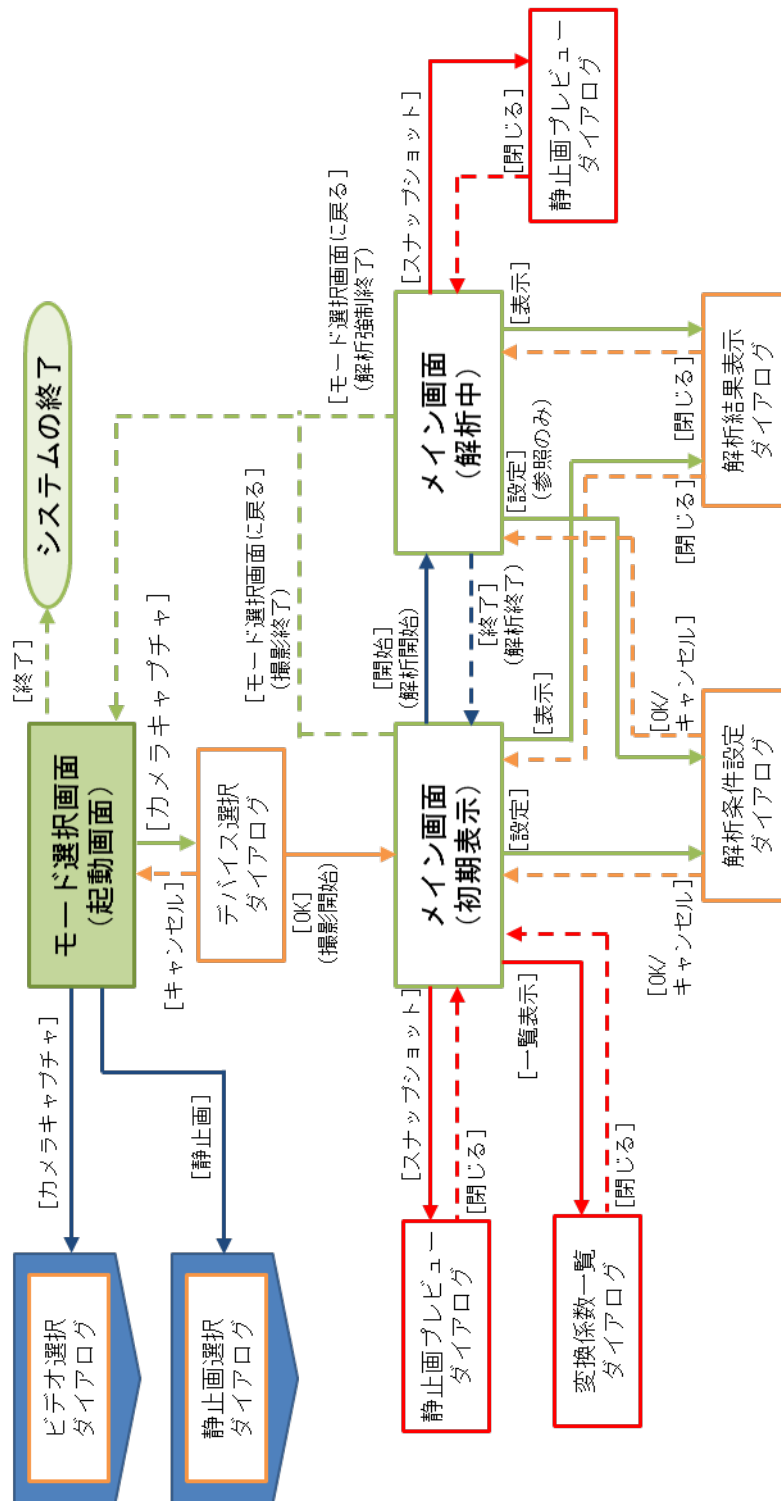


図2-4 チェレンコフ光評価プログラム画面遷移(カメラキヤプチャモード時)

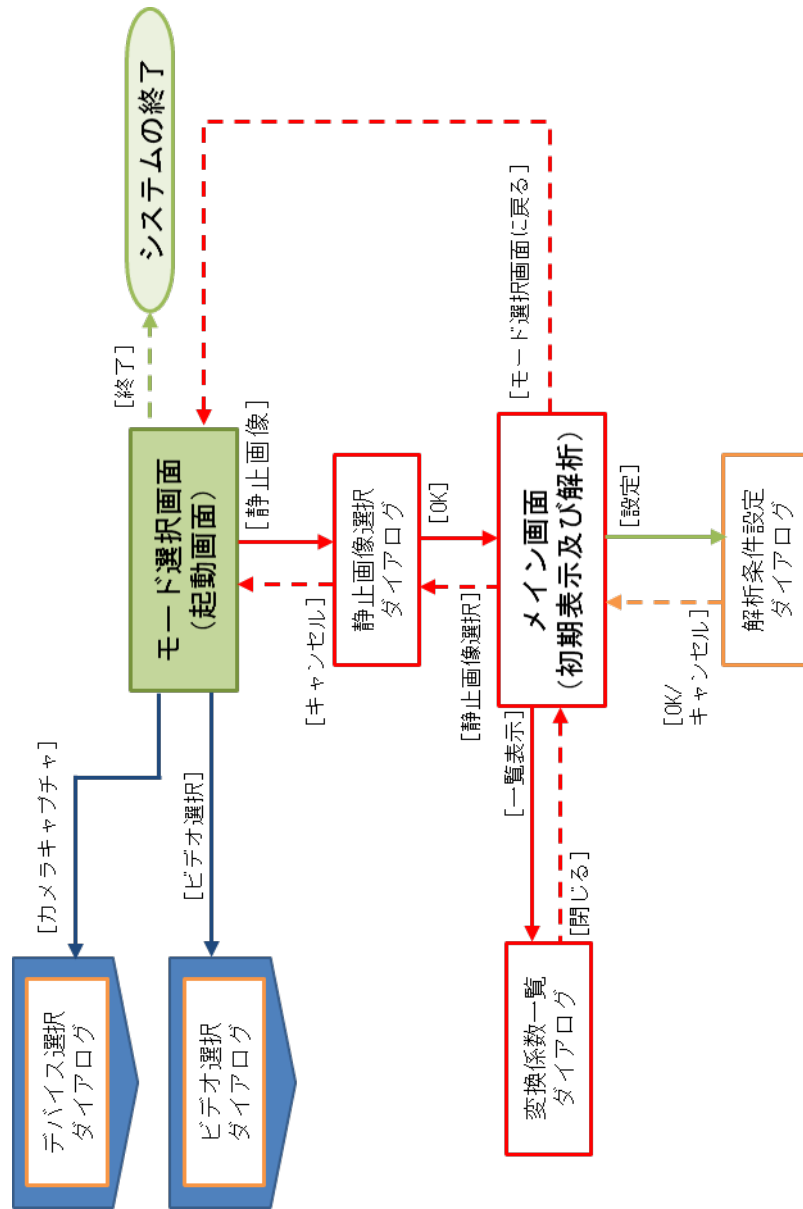


図 2-5 チェレンコフ光評価プログラムの画面遷移 (静止面モード時)



図 2-6 チェレンコフ光評価プログラムの画面遷移図の凡例

変換係数の作成

静止画像選択 モード選択画面に戻る

解析

設定 実行

解析日時	輝度値(補正なし)	輝度値(補正あり)
2016/04/21 10:05...	36.76	44.70

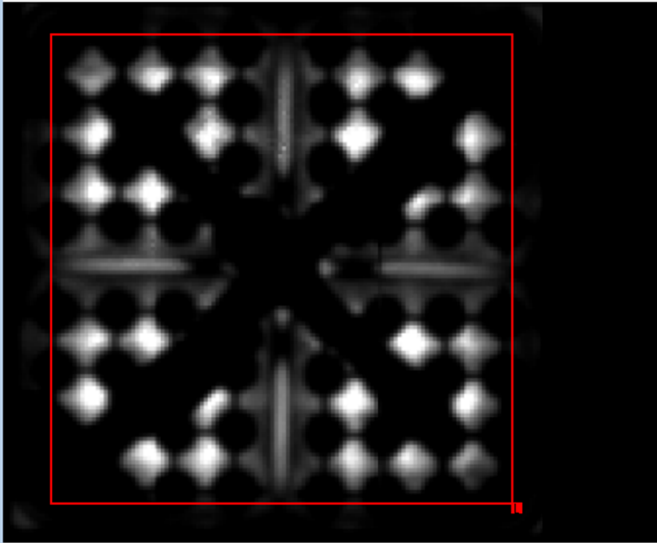
光子数テーブル PTABLE_BWR_SAMPLE

冷却期間 2 [year] 燃焼度 指定値 39 [GWd]

変換係数

20160421_BWR_2year_39GWd 作成

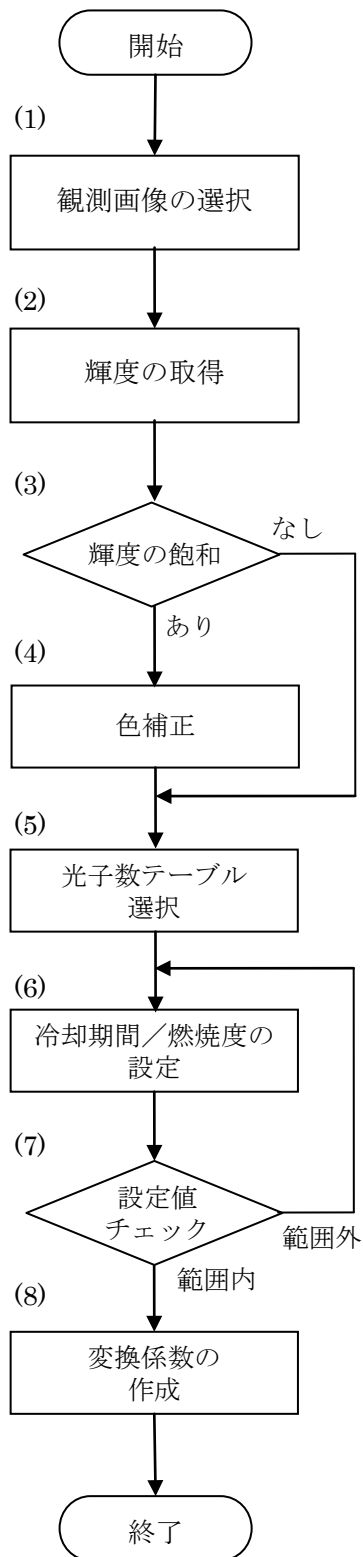
[x=447,y=483]



変換係数 一覧

No.	変換係数(名称)	変換係数(値)	光子数テーブル	冷却期間[year]	燃焼度[GWd]
▶	20160419_BWR_5yea...	3.9427e+016	PTABLE_BWR_SAMP...	5	39
	20160420_BWR_4yea...	2.9055e+016	PTABLE_BWR_SAMP...	4	39
	20160421_BWR_2yea...	3.2841e+016	PTABLE_BWR_SAMP...	2	39

図 2-7 変換係数の作成画面



- (1) ファイル選択ダイアログを使用し、燃焼度及び冷却期間が既知の使用済燃料集合体の観測画像（ビットマップ）を選択する。
- (2) 観測画像が表示された画面で選択しているエリアの1ピクセル毎の色コード(RGB)を取り出し、ピクセル単位でグレースケール変換したものを輝度とする。
- (3) 輝度が飽和していないかチェックする。
- (4) 輝度が飽和している場合は、色補正をし、再度ピクセル単位でグレースケール変換したものを輝度とする。
- (5) 観測した使用済燃料集合体に対応する光子数テーブルを選択する。
- (6) 観測した使用済燃料集合体の冷却期間及び燃焼度を設定する。
- (7) (6)で設定した冷却期間及び燃焼度が、(5)で選択した光子数テーブルにおける冷却期間及び燃焼度の最小値から最大値の範囲内か判定する。範囲外の場合は、冷却期間と燃焼度を再入力する。
- (8) チェレンコフ光子数テーブルから取得した光子数の観測画像から取得した輝度に対する比を変換係数とし、変換係数テーブルに登録する。

図 2-8 変換係数の作成処理フロー

解析結果：燃焼度 推定値 [Gwd] の 時間推移

カメラキャプチャモード 頁番号 2 / 2 閉じる

撮影日時	輝度値(補正あり)	輝度値(補正あり)	燃焼度 [Gwd]
2016/01/07 17:20:06	63.06	63.99	13.02
2016/01/07 17:20:11	63.11	64.03	13.03
2016/01/07 17:20:16	63.16	64.09	13.05
2016/01/07 17:20:22	63.11	64.04	13.03
2016/01/07 17:20:27	63.24	64.17	13.06
2016/01/07 17:20:32	63.16	64.09	13.05
2016/01/07 17:20:37	63.01	63.92	13.01
2016/01/07 17:20:42	62.95	63.86	12.99
2016/01/07 17:20:47	62.99	63.91	13.01
2016/01/07 17:20:52	63.02	63.93	13.01
2016/01/07 17:20:57	63.04	63.96	13.02
2016/01/07 17:21:02	63.00	63.92	13.01
2016/01/07 17:21:07	63.07	63.98	13.02
2016/01/07 17:21:12	63.19	64.16	13.06
2016/01/07 17:21:17	63.20	64.14	13.06
2016/01/07 17:21:22	63.11	64.04	13.04
2016/01/07 17:21:28	63.04	63.96	13.02
2016/01/07 17:21:28	63.07	63.99	13.02

解析周期 5 [sec]

起点の座標
X座標 121 [pixel]
Y座標 339 [pixel]

解析範囲
幅 356 [pixel]
高さ 125 [pixel]

指定ページにジャンプ
頁番号 Go

<< 前頁 < 前頁 次頁 > 末尾頁 >>

図 2-9 解析結果表示ダイアログ

A1 : X ✓ fx

解析日時:2016/01/05 17:31:01; 矩形領域 始点(左上隅)の座標 [pixel] = (121, 339); 矩形領域の寸法(幅, 高さ) [pixel] = (356, 125); 輝度値の補正係数... RED:1, GREEN:2.4, BLUE:4.4, BLUE2:1.8, GAIN_GREEN:1.5, GAIN_BLUE:1.5; 変換係数: 20160108_dummy2=8.45E+01

	A	B	C	D	E	F
1	解析日時:2016/01/05 17:31:01; 矩形領域 始点(左上隅)の座標 [pixel] =					
2	解析日時	輝度値(補正あり)	輝度値(補正あり)	燃焼度 推定値[Gwd]		
3	2016/1/5 17:31	93.11	96.53	55.5		
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						

20160105_2_CRK

図 2-10 解析結果 CSV ファイル出力例

3. 使用済燃料集合体の燃焼度推定用データベース

3.1. 概要

使用済燃料集合体の観測画像から燃焼度の評価を行うため、対象となる炉心ごとにデータベースを作成する必要がある。本研究では、一般的な原子炉 (PWR 又は BWR) の使用済燃料集合体を対象としデータベースを作成した。

3.2. データベースの作成フロー及び構成

データベースの作成フロー及び構成の概要を図 3-1 に、チェレンコフ光子数の計算イメージを図 3-2 に示す。データベースは、使用済燃料集合体の冷却期間及び燃焼度に対するチェレンコフ光子数のテーブルと、使用済燃料集合体観測画像の明るさをチェレンコフ光子数に変換する変換係数のテーブルにより構成される。

3.3. チェレンコフ光子数テーブルの作成

チェレンコフ光子数テーブルは、まず、ORIGEN2 コード^[6]により使用済燃料集合体の燃焼度及び冷却期間毎の燃焼計算を実施し、核分裂生成物に起因する線源スペクトル（ガンマ線及びベータ線）を求める。作成する際の燃焼度及び冷却期間を表 3-1 に、燃焼計算の計算条件を表 3-2 に示す。次に、その線源スペクトルを元に EGS5 コード^[7]により使用済燃料集合体近傍のチェレンコフ光子発生数を求める。EGS5 コード^[7]に使用したモデルを図 3-3 及び図 3-4 に示す。その後、使用済燃料ラックを想定し周囲の使用済燃料集合体からのチェレンコフ光を足し合わせる事により、使用済燃料集合体上部のチェレンコフ光子数を求める。上記計算より、燃焼度及び冷却期間毎にチェレンコフ光子数テーブルを作成した。冷却期間毎の燃焼度とチェレンコフ光子数のグラフを図 3-5 及び図 3-6 に示す。冷却期間が 0 年の時は、核分裂反応に伴う即発 γ 線が支配的であることから、燃焼度の違いによるチェレンコフ光子数の変化がない。

3.4. 変換係数

変換係数は、観測した使用済燃料集合体の燃焼度及び冷却期間に該当するチェレンコフ光子数の観測画像の明るさに対する比として登録される。作成には、2.3.2 節にある変換係数の作成画面を使用する。

尚、変換係数作成の際に指定できる冷却期間及び燃焼度は、チェレンコフ光子数テーブルにおける冷却期間及び燃焼度の最小値から最大値の範囲内に限るものとする。即ち、外挿はしない。

同様に、燃焼度推定の際に指定できる冷却期間もチェレンコフ光子数テーブルにおける冷却期間の最小値から最大値の範囲内に限るものとする。また、チェレンコフ光観測画像より得られた明るさ及び変換係数から求めたチェレンコフ光子発生数についても、与えられた冷却期間で内挿した燃焼度に対するチェレンコフ光子発生数グラフの範囲内に限るものとする。つまり、燃焼度推定値がチェレンコフ光子数テーブルにおける燃焼度の範囲外になる様な明るさのチェレンコフ光観測画像を用いることはできない。

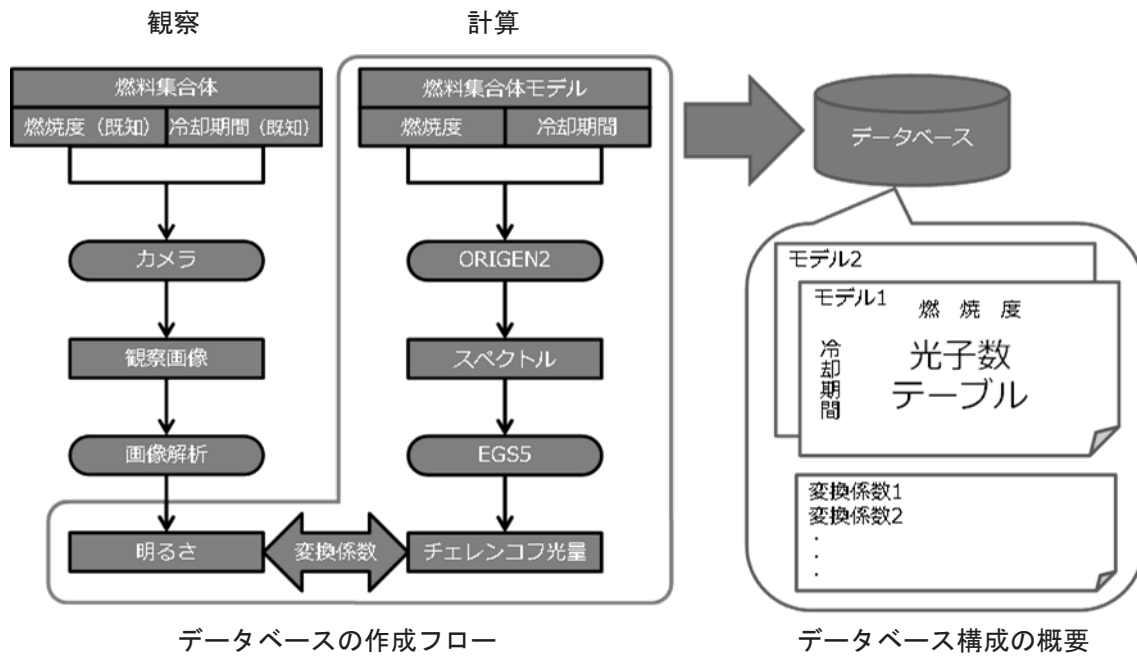


図 3-1 データベースの作成フロー及び構成の概要

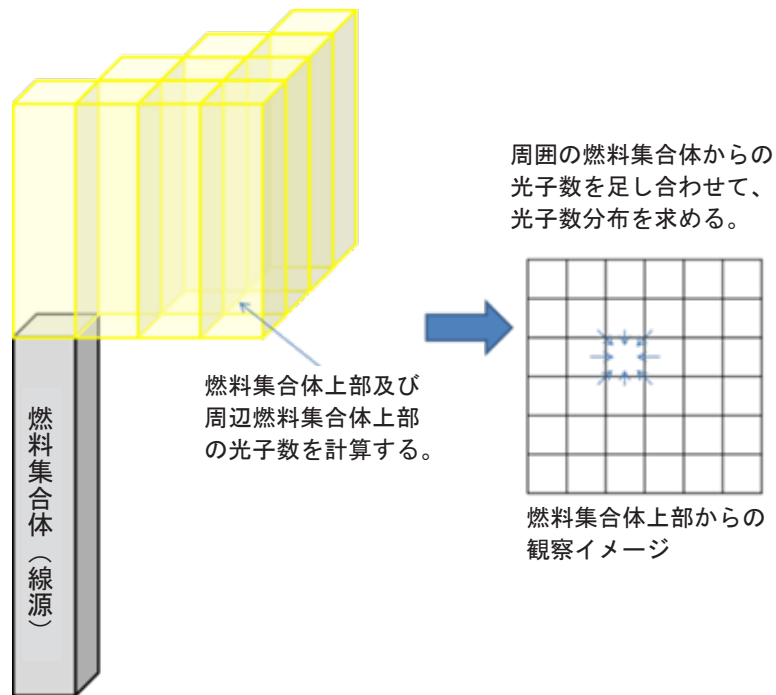


図 3-2 チェレンコフ光子数の計算イメージ

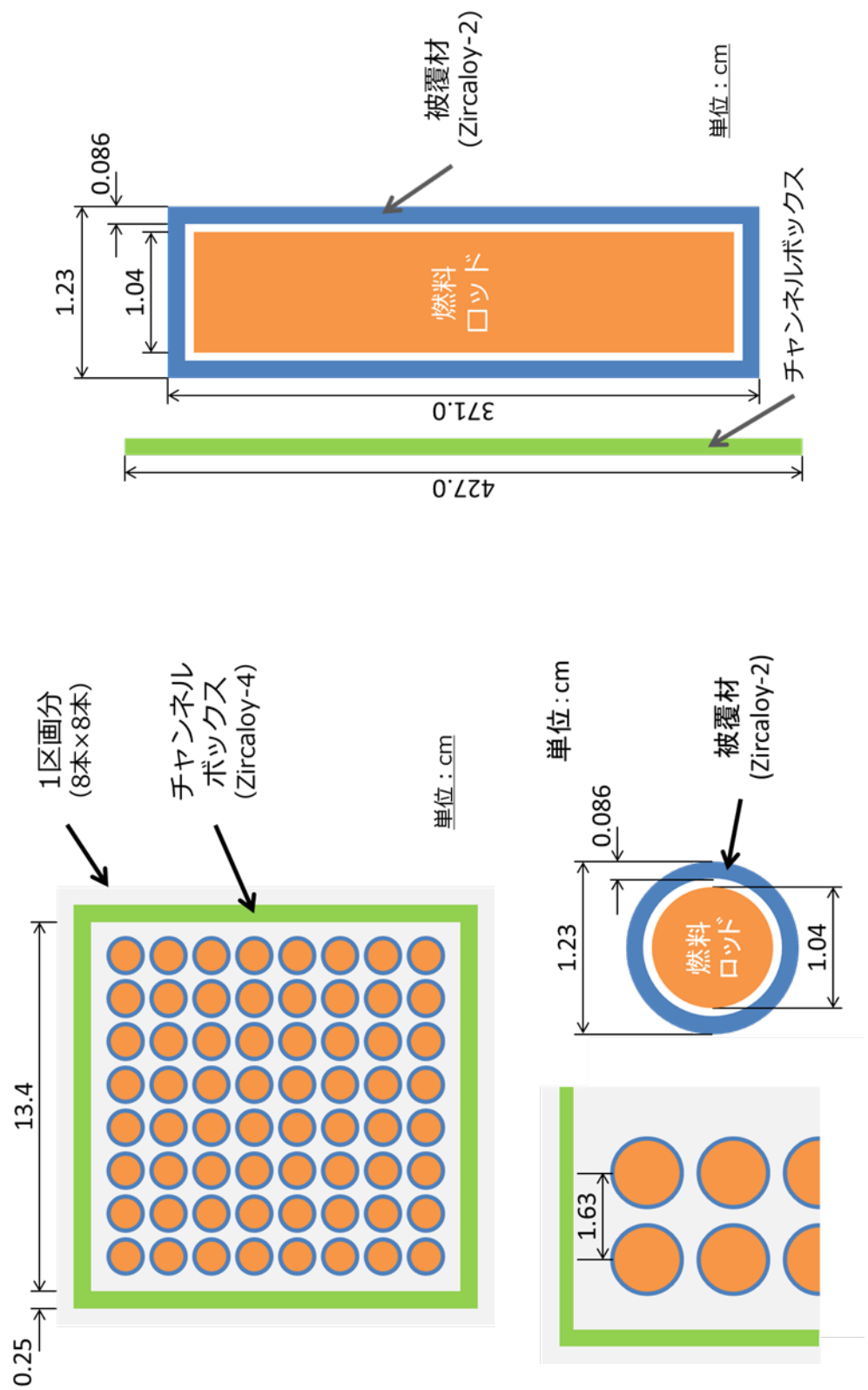


図 3-3 計算モデル (BWR)

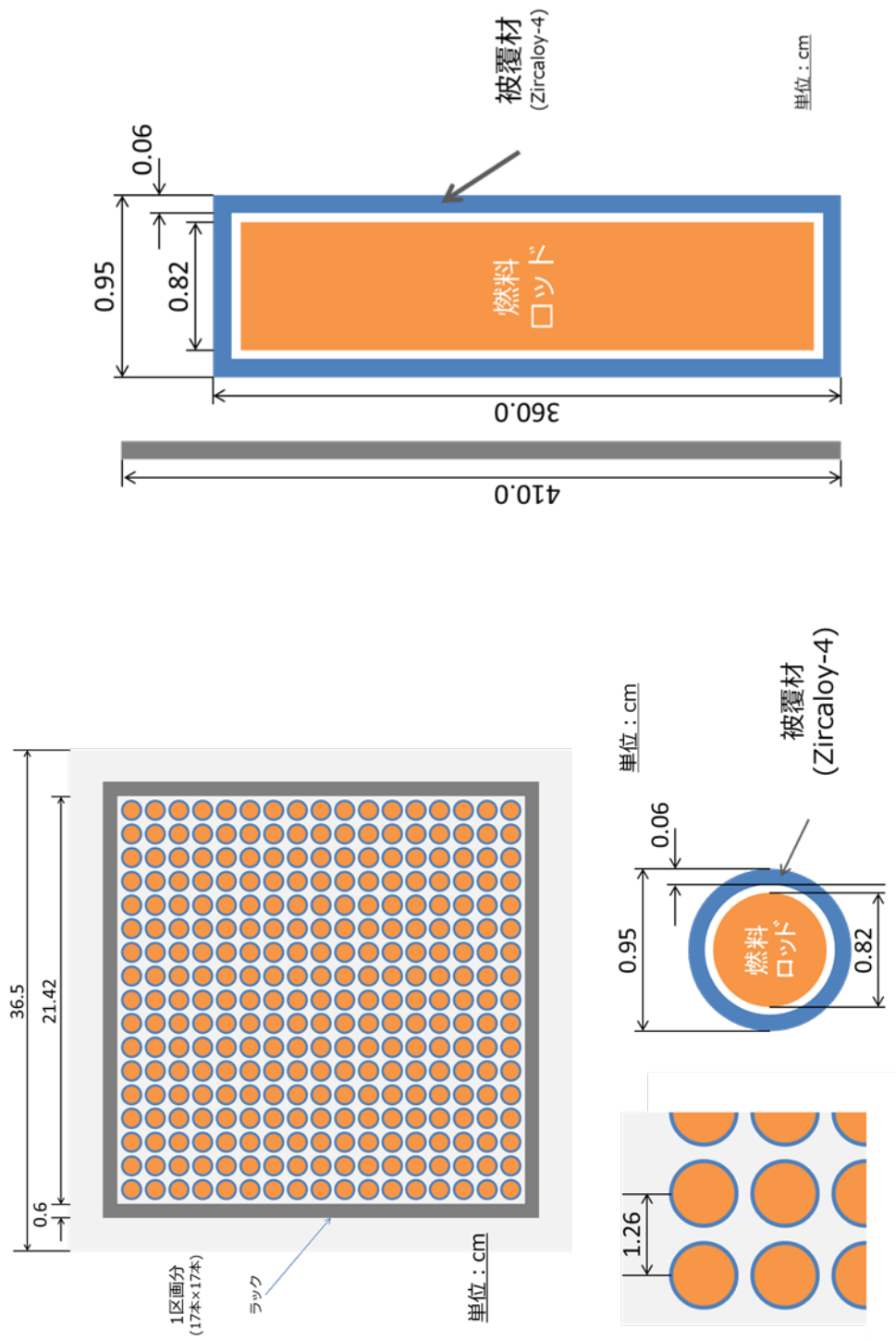


図 3-4 計算モデル (PWR)

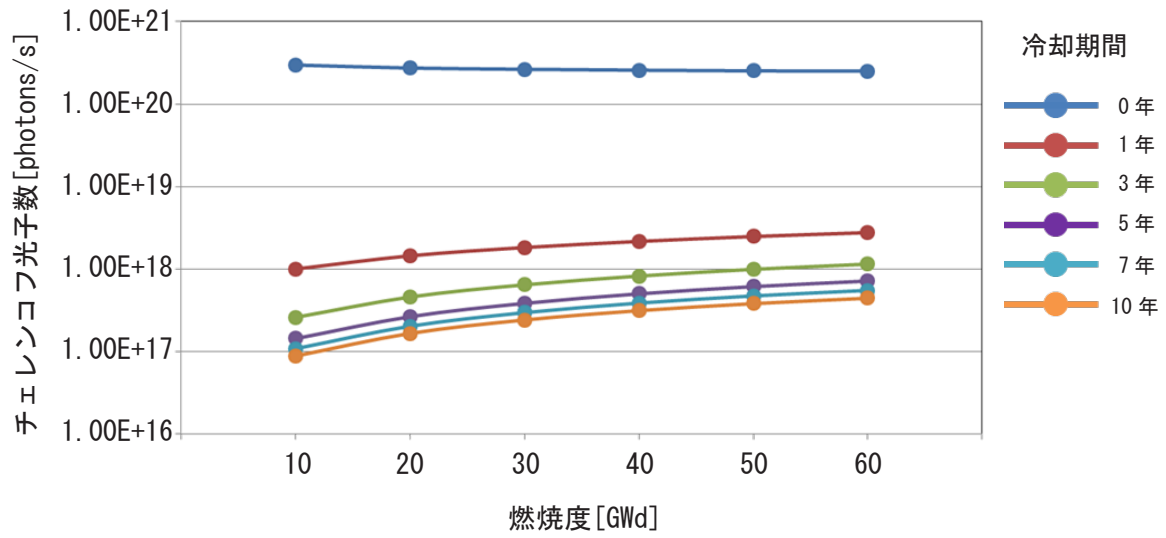


図 3-5 チェレンコフ光子発生数 (BWR)

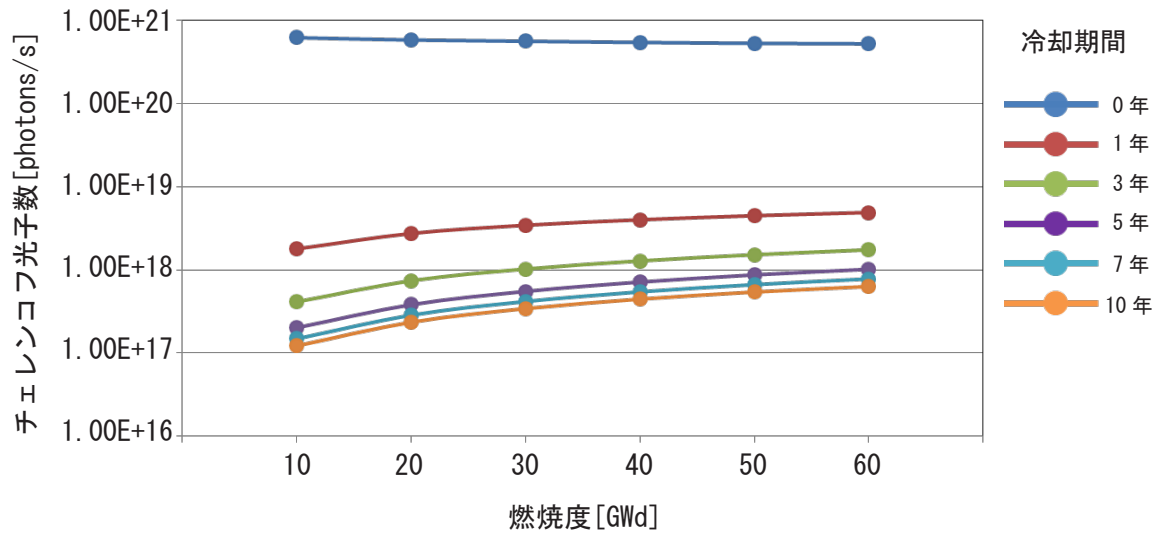


図 3-6 チェレンコフ光子発生数 (PWR)

表 3-1 燃焼度及び冷却期間

項目	値
燃焼度 [GWd]	10、20、30、40、50、60
冷却期間 [年]	0、1、3、5、7、10

表 3-2 燃焼計算の計算条件^[8]

燃焼度 [GWd/MTU]	BWR		PWR	
	比出力 [MW/MTU]	濃縮度	比出力 [MW/MTU]	濃縮度
10	26.2	3.5%	38.5	4.1%
20				
30				
40				
50				
60				

4. チェレンコフ光評価システムの検証試験

4.1. チェレンコフ光観測画像を用いた検証

本システムで新規追加した機能である変換係数の作成と静止画モードでの燃焼度推定の動作検証を行った。動作検証には、参考文献^[9]に記載されている燃焼度及び冷却期間が既知の使用済燃料集合体のチェレンコフ光観測画像を用いることとした。検証に用いた画像の詳細について、図 4-1 に示す。

まず、燃焼度推定用の変換係数をデータ 1（冷却期間 2 [年]、燃焼度 39 [GWd]）を基に 2 通り作成した（図 4-2）。一方は、解析領域を観測画像から確認できる燃料集合体全体に、もう一方は、解析領域を燃料集合体の一部に設定した。次に、作成した変換係数を基にデータ 2, 3, 4 について燃焼度推定を実施した。燃焼度推定の際は、変換係数を作成した時と同様に 2 通りの解析範囲を設定した（図 4-3 及び図 4-4）。

燃焼度推定の結果を表 4-1 に示す。データ 2、データ 3 については、実測値との誤差が各解析範囲のどちらの場合においても 15%以内であり、参考文献^[7]に記載されている燃焼度と良い一致を示した。しかし、データ 4 については、参考文献^[7]に記載されている燃焼度との誤差が各解析範囲のどちらの場合においても 30%以上となった。

これらの事から、解析範囲による燃焼度推定への影響は見られなかった。一方、冷却期間が 6 年経過した観測画像における燃焼度推定値と文献値の差が大きかったことから、チェレンコフ光観測画像から燃焼度を推定するためには観測画像が鮮明（明るい）でなければならないと考えられる。

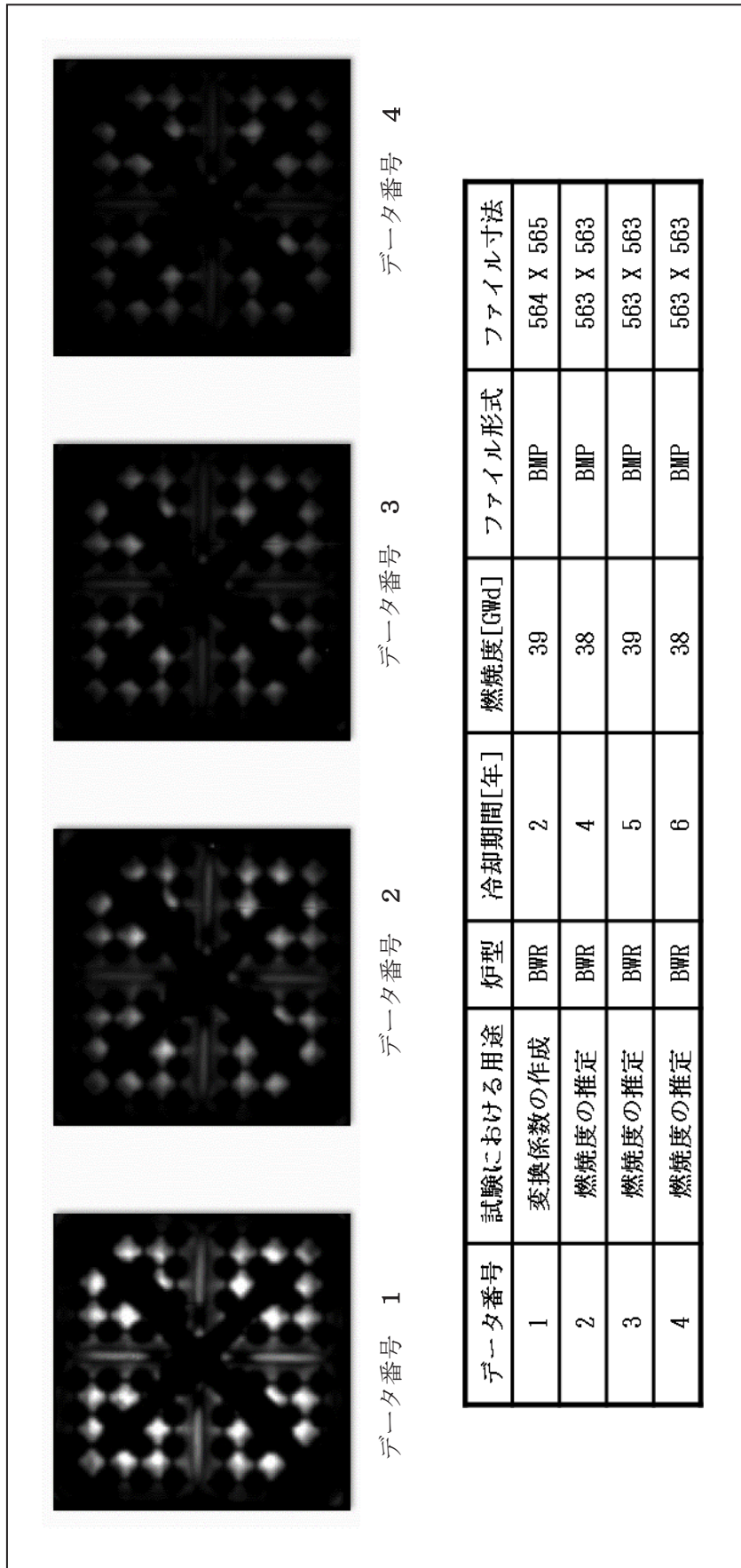
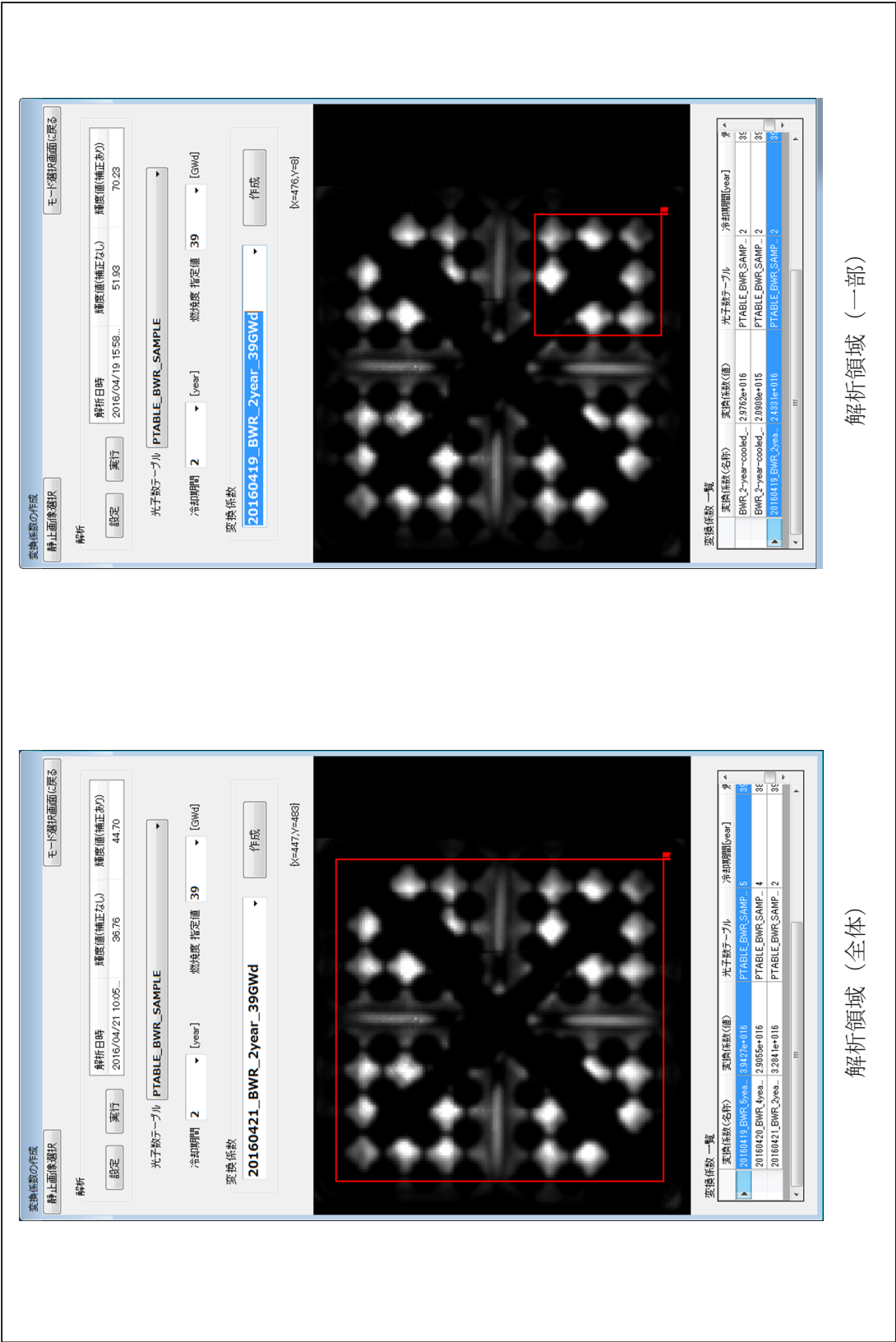


図4-1 検証試験に用いたデータ 画像一覧



交換係数の作成

静止画像選択

モード選択画面に戻る

解析

解析日時

2016/04/19 15:58...

精度値(補正なし)

51.93

精度値(補正あり)

70.23

設定

実行

光子数テーブル

PTABLE_BWR_SAMPLE

冷却時間

2

[year]

燃焼度 指定値

39

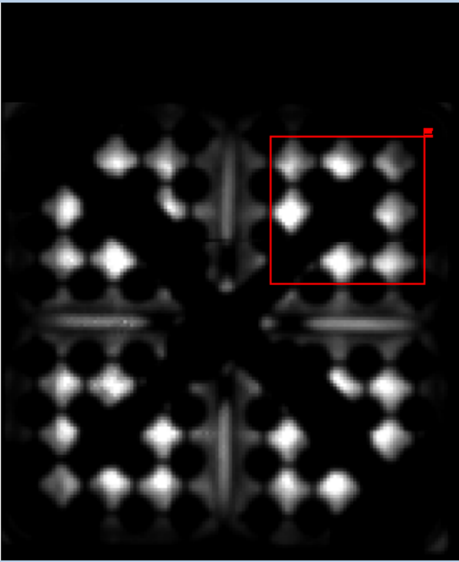
[Gwd]

交換係数

20160419_BWR_2year_39Gwd

作成

[x=476,y=8]

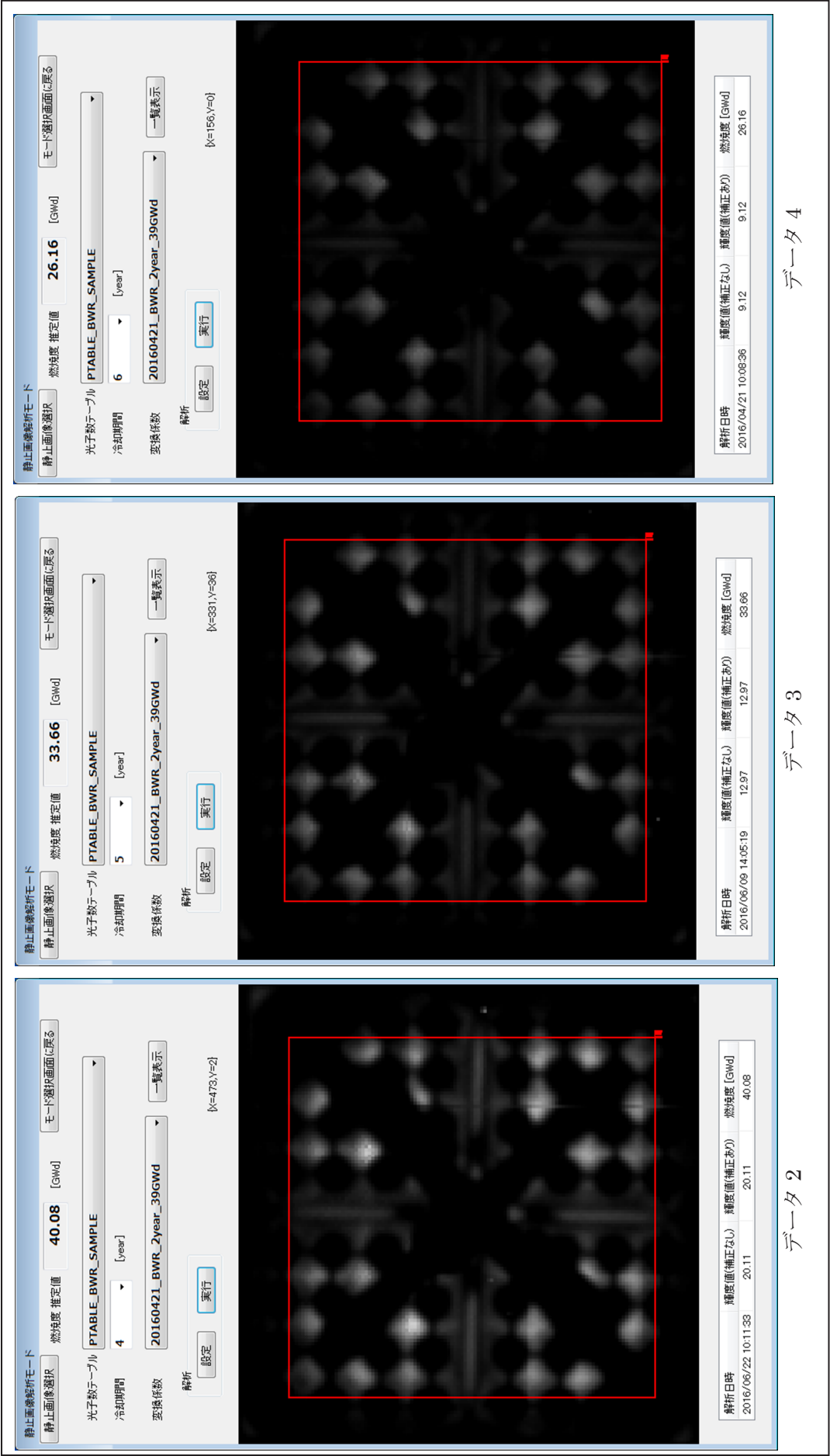


交換係数一覧

交換係数(名称)	交換係数(値)	光子数テーブル	冷却時間[year]	燃
BWR_2-year-cooled...	2.9782e+016	PTABLE_BWR_SAMP...	2	35
BWR_2-year-cooled...	2.0808e+015	PTABLE_BWR_SAMP...	2	35
20160419_BWR_2yea...	2.4331e+016	PTABLE_BWR_SAMP...	2	35

解析領域 (一部)

図 4-2 変換係数作成 (データ 1)



静止画像解析モード

静止画像選択

燃焼度 推定値

33.66

[Gwd]

モード選択画面に戻る

光子数テーブル

PTABLE_BWR_SAMPLE

冷却時間

5

[year]

変換係数

20160421_BWR_2year_39Gwd

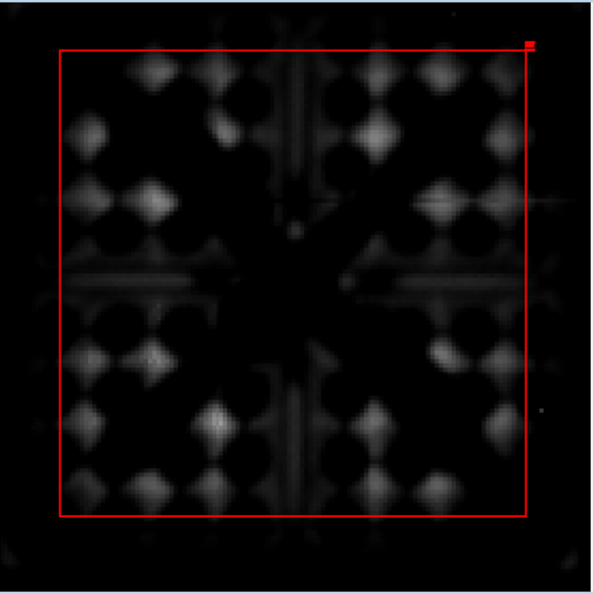
一覧表示

解析

設定

実行

[x=331,y=36]



解析日時

2016/06/09 14:05:19

燃焼度 [Gwd]

12.97

12.97

33.66

データ 3

静止画像解析モード

静止画像選択

燃焼度 推定値

26.16

[Gwd]

モード選択画面に戻る

光子数テーブル

PTABLE_BWR_SAMPLE

冷却時間

6

[year]

変換係数

20160421_BWR_2year_39Gwd

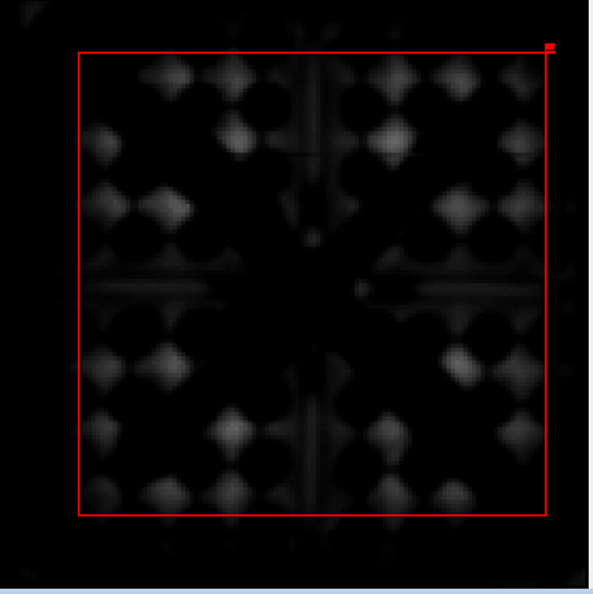
一覧表示

解析

設定

実行

[x=153,y=0]



解析日時

2016/04/21 10:08:36

燃焼度 [Gwd]

9.12

9.12

26.16

データ 4

図 4-3 燃焼度推定結果 1（解析領域：全体）

表 4-1 推定値と実測値の比較

			燃焼度[GWd]		推定値/ 実測値
			実測値	推定値	
解 析 範 囲	全 体	データ 2	38.00	40.08	1.05
		データ 3	39.00	33.66	0.86
		データ 4	38.00	26.16	0.69
	一 部	データ 2	38.00	36.48	0.96
		データ 3	39.00	34.93	0.90
		データ 4	38.00	25.85	0.68

5. まとめ

本研究では、参考文献^[5]で設計・試作したシステムを改良し、発電用原子炉の使用済燃料集合体の監視を行えるチェレンコフ光評価システムとし、冷却期間及び燃焼度が既知の BWR 用使用済燃料集合体の観測画像を用いて動作検証を実施した。得られた結果は以下の通りである。

(1) システムの改良

文献で設計・試作したシステムに変換係数作成機能及び燃焼度推定機能を追加し、発電用原子炉の使用済燃料集合体の監視を行えるチェレンコフ光評価システムとした。

(2) データベースの作成

チェレンコフ光観測画像から取得した輝度から使用済燃料集合体の燃焼度を推定するデータベースを作成した。なお、データベースの対象は一般的な原子炉(PWR 又は BWR)の使用済燃料集合体とした。

(3) 検証試験

燃焼度及び冷却期間が既知の BWR 用使用済燃料集合体のチェレンコフ光観測画像を用いて改良したシステムで評価した推定値は、参考文献^[9]の燃焼度と概ね一致した。一方、冷却期間が 6 年の使用済燃料集合体の推定値は文献値よりも差が大きくなることから、チェレンコフ光観測画像から燃焼度を推定するためには観測画像が鮮明（明るい）でなければならないと考えられる。

謝 辞

本研究開発成果は、発電用原子炉等安全対策高度化技術基盤整備事業「特殊環境下で使用可能な監視システム高度化」の一部である。

本研究開発の実施にあたり、大洗研究開発センター 石原正博副所長(兼照射試験炉センター長)に有意義なご指導及びご助言を頂きました。また、本報告書をまとめるにあたり、原子力科学研究所 研究炉加速器管理部 研究炉技術課 峯島博美課長に有意義なご助言をいただきました。さらに、伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 石塚龍雄氏、浅山景子氏には多大なご協力を頂きましたことを深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会(委員長：畑村洋太郎),「東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証(最終報告書)」, 平成 24 年 7 月 23 日.
- [2] 政府・東京電力中長期対策会議決定,「東京電力(株)福島第一原子力発電所 1～4 号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」, 平成 23 年 12 月 21 日.
- [3] 原子力災害対策本部,「原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書」, 平成 23 年 6 月.
- [4] 経済産業省,「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の技術的知見について」, 平成 24 年 3 月.
- [5] 山本圭一, 武内伴照, 林 隆康, 小菅史明, 佐野忠史, 土谷邦彦,「チェレンコフ光観測の原子炉計測への適用(2)―チェレンコフ光評価システムの設計・試作―」, JAEA-Testing 2015-001, 2015, 25p.
- [6] S.Ludwig, ORIGEN2, Version 2.1 (8-1-91) Released Notes, revised May 1999.
- [7] EGS5 コード
<http://rcwww.kek.jp/research/egs/index.html> (アクセス日: 2015.12.8).
- [8] 軽水炉燃料のふるまい, (財) 原子力安全研究協会, 1990, 332p.
- [9] J.D. Chen, A.F. Gerwing et. al. : Cerenkov Characteristic of BWR Assemblies Using a Prototype DCVD With a Back-Illuminated CCD, CSSP Report 2004-01-01 and SKI Report ISRN SHI-R-03/45.

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

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

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

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

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてののみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。

(g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒 ニュートンメートル	Pa s N m	m ⁻¹ kg s ⁻¹ m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
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	名称	記号	乗数	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

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

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=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=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオット	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≡ (10 ³ /4 π) A m ⁻¹

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

表 10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15℃」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ =1 μm=10 ⁻⁶ m

