

チェレンコフ光観測の原子炉計測への適用(2) ーチェレンコフ光評価システムの設計・試作ー

Application of Cherenkov Light Observation to Reactor Measurements (2)
- Design and Trial Fabrication of Cherenkov Light Estimation System -

山本 圭一 武内 伴照 林 隆康 小菅 史明
佐野 忠史 土谷 邦彦

Keiichi YAMAMOTO, Tomoaki TAKEUCHI, Takayasu HAYASHI, Fumiaki KOSUGE
Tadafumi SANO 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 2015

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(2)

—チェレンコフ光評価システムの設計・試作—

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}、佐野 忠史^{*2}、土谷 邦彦

(2015 年 9 月 15 日受理)

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の開発の一環として、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。本報告書は、燃料要素から放出されるチェレンコフ光の観測画像から熱出力を推定するチェレンコフ光評価システムの設計・試作を行い、その動作検証をまとめたものである。

本開発では、京都大学研究用原子炉の運転中におけるチェレンコフ光観測画像を用いて、開発したチェレンコフ光評価システムの検証を行った。その結果、原子炉熱出力 1MW～5MW 上昇時のチェレンコフ光観測画像から抽出した輝度から推定した燃料要素の熱出力と、炉心解析コード(SRAC)により計算した燃料要素の熱出力が概ね良い一致を示した。一方、一部の燃料要素においては推定値と計算値が異なることから、観測方法の改良や画像解析時における輝度の補正方法について検討する必要があることがわかった。

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

*2 京都大学原子炉実験所

Application of Cherenkov Light Observation to Reactor Measurements (2) - Design and Trial Fabrication of Cherenkov Light Estimation System -

Keiichi YAMAMOTO^{※1}, Tomoaki TAKEUCHI, Takayasu HAYASHI^{*1}, Fumiaki KOSUGE^{*1},
Tadafumi SANO^{*2} 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 15, 2015)

Development of the reactor measurement system was started to obtain the real-time in-core nuclear and thermal information, where the quantitative measurement of brightness of Cherenkov light was investigated. This report summarized the results of design and trial fabrication of the Cherenkov light estimation system from thermal power evaluation from Cherenkov light image emitted from the fuel elements.

The developed Cherenkov light estimation system was verified with the Cherenkov light image emitted from the fuels in the core of Kyoto University Research Reactor (KUR). From the results, the thermal power of the fuel elements evaluated from the brightness of the Cherenkov light observed by a CCD camera was almost the same as that of thermal power calculated from SRAC code. On the other hand, the evaluation values of some fuel elements were different from the calculation values. This, it is necessary to improve the observation method of Cherenkov light in the reactor and the evaluation method of the brightness of Cherenkov light.

Keywords: Reactor Measurement, Cherenkov Light Estimation System, Thermal Power, SRAC Code, KUR

※ 1 Special Topic Researcher

* 1 ITOCHU Techno-Solutions Corporation

* 2 Kyoto University Research Reactor Institute

目 次

1. はじめに	1
2. チェレンコフ光評価システムの設計	1
2.1. 概要	1
2.2. 画面構成	2
2.3. 機能	3
2.3.1. チェレンコフ光観測画像の取得	3
2.3.2. 解析条件の設定	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. 燃料要素の熱出力推定用データベース	13
3.1. 概要	13
3.2. チェレンコフ光観測画像の輝度	13
3.3. チェレンコフ光子数の計算	13
3.4. 変換係数	13
3.5. データベースの作成	14
4. チェレンコフ光評価システムの検証試験	17
4.1. KUR チェレンコフ光観測画像による検証	17
5. 使用済燃料プールへの適用	23
6. 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	2
2.3. Function of System	3
2.3.1. Acquisition of Cherenkov Light Image	3
2.3.2. Establishment of Estimation Conditions	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	13
3.1. Outline	13
3.2. Brightness of Cherenkov Light Image	13
3.3. Calculation of Cherenkov Light Intensity	13
3.4. Conversion Coefficient	13
3.5. Preparation of Database	14
4. Verification Tests of Cherenkov Light Estimation System	17
4.1. Verification of Cherenkov Light Image in KUR	17
5. Application to Fuel Element	23
6. 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-Technology 2014-028(チェレンコフ光観測の原子炉計測への適用(1))^[5]で評価した燃焼燃料中に存在する放射性核種からの γ 線及び β 線を推定する手法に基づいて、チェレンコフ光を利用した炉内監視技術の確立を目的とし、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し、通常の計装機器では監視できない炉心内の核的・熱的情報をリアルタイムで監視することが可能なチェレンコフ光評価システムを設計・試作した。開発したチェレンコフ光評価システムを用いて、京都大学研究用原子炉(KUR)でチェレンコフ光観測時に取得した画像から抽出した輝度と燃料要素の熱出力との関係性を評価した。

2. チェレンコフ光評価システムの設計

2.1. 概要

チェレンコフ光評価システムは、CCD カメラ、ビデオキャプチャボードとチェレンコフ光評価プログラムがインストールされたPCで構成されている。本システムの概要を図2-1に示す。また、ソフトウェアの開発環境は以下の通りとした。

・開発環境

- ・OS : Microsoft® Windows 7 (32bit, 64bit)
- ・プロセッサ : Intel Core 2 Duo 相当以上のプロセッサ
- ・メモリ : 4GB 以上
- ・ハードディスク : 20GB 以上の空きスペース
- ・開発言語 : Microsoft® Visual Basic .NET
- ・フレームワーク : .NET Framework4.5 以上

2.2. 画面構成

チェレンコフ光評価プログラムは、モード選択画面、選択ダイアログ、画像解析画面、解析条件設定ダイアログ及び解析結果表示ダイアログで構成されている。本評価プログラムの画面構成を図 2-2 に示す。得られたチェレンコフ光観測画像は、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、図 2-4)

評価②：カメラキャプチャモード(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、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と燃料要素熱出力の評価を行う。

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. 解析条件設定ダイアログで画像解析の条件を設定する。
4. 「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)
5. 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。
6. 「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。
7. 「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、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と燃料要素熱出力の評価を行う。

A) 画像解析

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. 解析条件設定ダイアログで画像解析の条件を設定する。
4. 「解析」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)
5. 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。
6. 「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。

B) 撮影画像の録画

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. 「録画開始」ボタンをクリックすると保存先 HDD 空き容量の確認ダイアログが表示される。
保存先 HDD に十分な空き容量がある場合は録画を開始する。
4. 「録画終了」ボタンをクリックし、録画を終了する。録画が終了すると動画ファイルを出力する。

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. 解析条件の設定

解析条件設定ダイアログを図 2-7 に示す。解析条件設定ダイアログはモードレスで、一方の変更は即時に他方に反映される。但し、解析条件の変更はシステムが解析実施中でない場合に限り可能である。以下に各設定項目の詳細を示す。

A) 解析周期

画像解析を行う周期を設定する。設定は解析条件設定ダイアログのみで行え、解析周期を 1 秒単位で設定することができる。

B) 解析範囲

画像解析の対象範囲を設定する。設定はメイン画面とダイアログのいずれからでも行える。メイン画面での解析範囲の設定方法を図 2-8 に示す。ダイアログを使用する場合は、矩形領域の座標(始点となる左上隅)と寸法を 1 ピクセル単位で設定することができる。座標は画像解析専用画面のクライアント座標系(専用画面の左上隅を始点として張られる 2 次元座標系)を用いる。

C) 解析範囲の画面表示 ON/OFF

画像解析範囲の画面への表示(ON)、非表示(OFF)を設定する。設定は解析条件設定ダイアログのみで行える。また、解析範囲の画面表示が非表示(OFF)の場合は解析を行えない。

2.3.3. チェレンコフ光観測画像解析

燃料要素の熱出力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燃料要素の熱出力を推定する。解析結果表示ダイアログを図 2-9 に、画像解析処理フローを図 2-10 に示す。熱出力推定の対象となる燃料要素は、カメラキャプチャモードのメイン画面又はビデオ再生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。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)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)
- ・ 燃料要素の熱出力 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、燃料要素の熱出力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。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 5 項目を出力する。
- ・ 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(PC システム時刻)
 - ・ 解析実施時の解析周期
 - ・ 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)
- 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、次に挙げる 4 項目である。なお、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。
- ・ 解析開始時からのビデオ再生時間(ビデオ再生モード)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)
 - ・ 燃料要素の熱出力 推定値
- C) ファイル生成規則
- ・ 保存先 CSV ファイルの絶対パスは、INI ファイルから読み込む。
 - ・ CSV ファイルは解析が正常終了した際に自動的に生成される。ファイル名には解析した年月日(PC システム時刻)を含める(例：20141016_CRK.csv)。
 - ・ CSV ファイル生成時に、解析実施日の時系列に沿って自動的に枝番を割り当て、別名で保存する。
- (例 : 20141016_CRK.csv, 20141016_2_CRK.csv, 20141016_3_CRK.csv, … ,
20141016_24_CRK.csv, …)

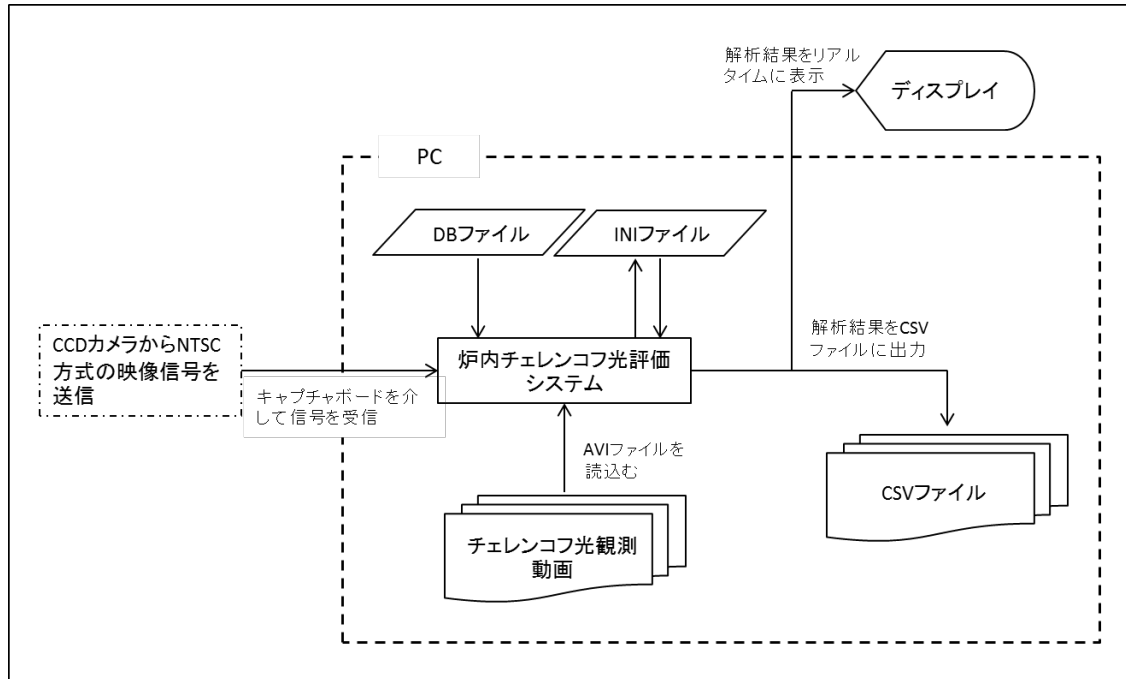


図 2-1 チェレンコフ光評価システムの概要

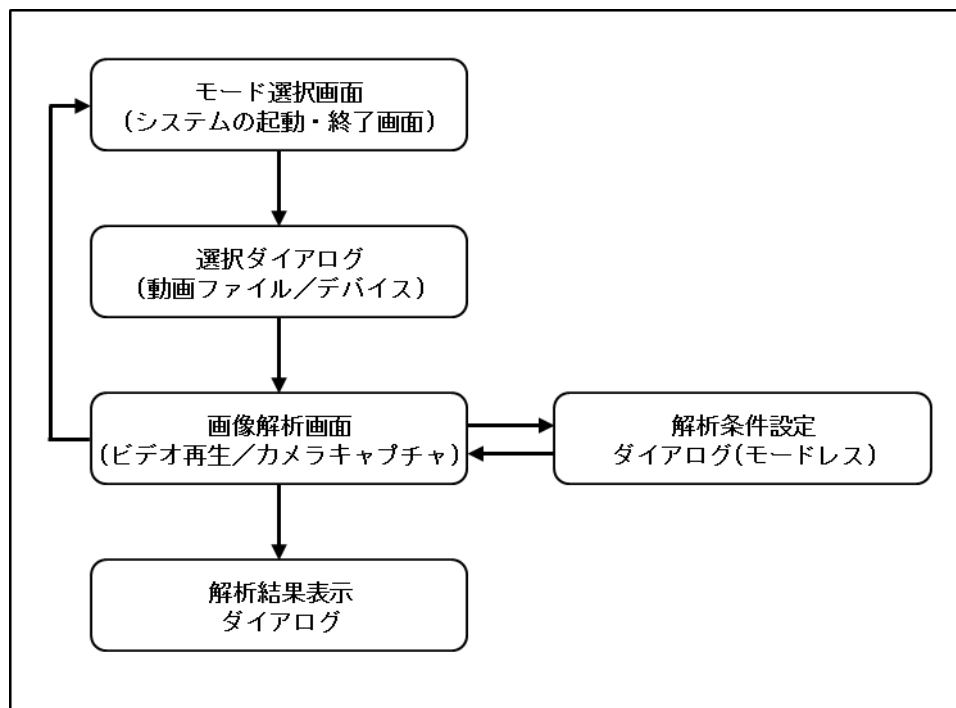


図 2-2 チェレンコフ光評価プログラムの画面構成

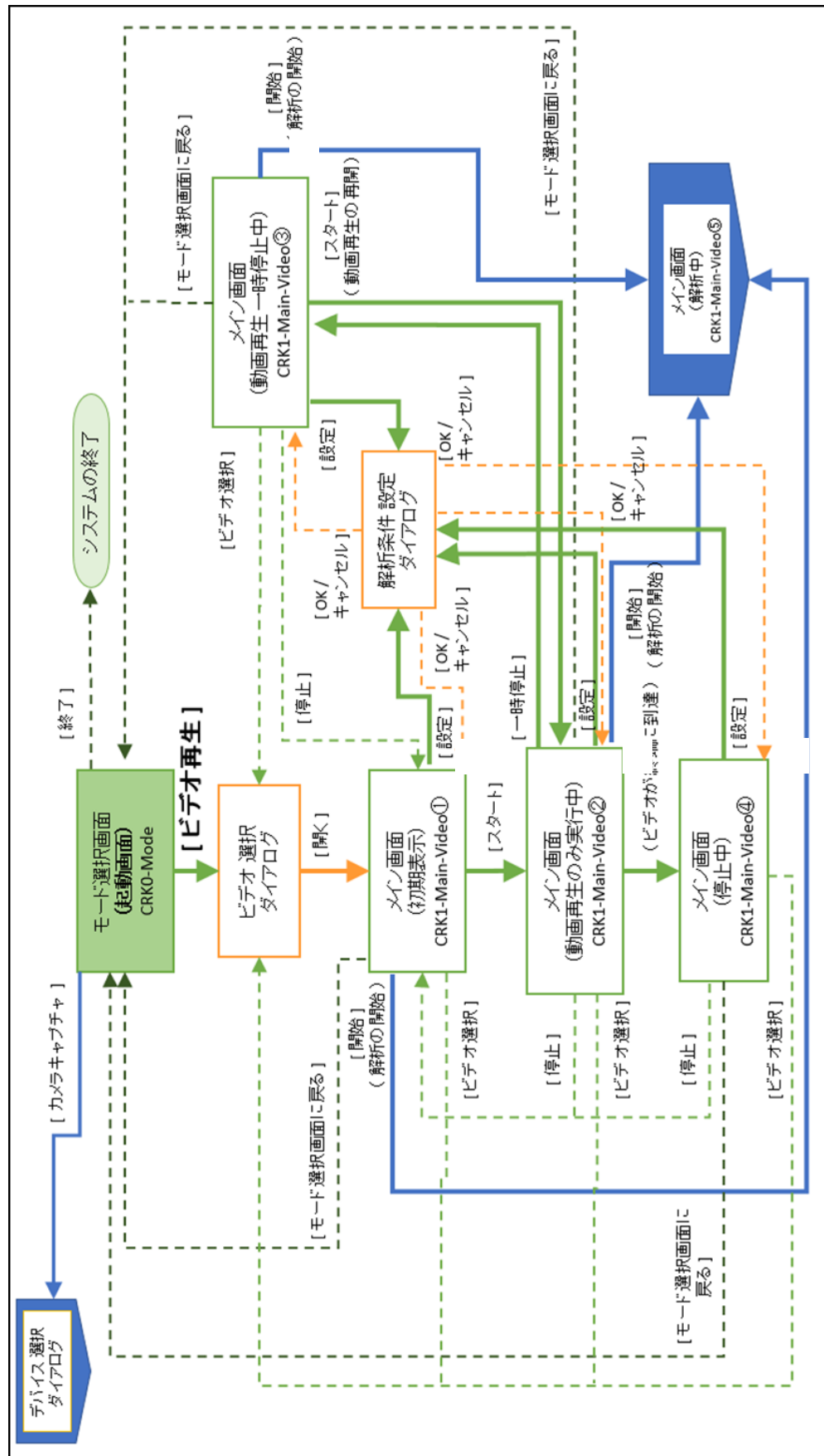


図 2-3 チェレンコフ光評価プログラムの画面遷移(ビデオ再生モード時：画像解析前)

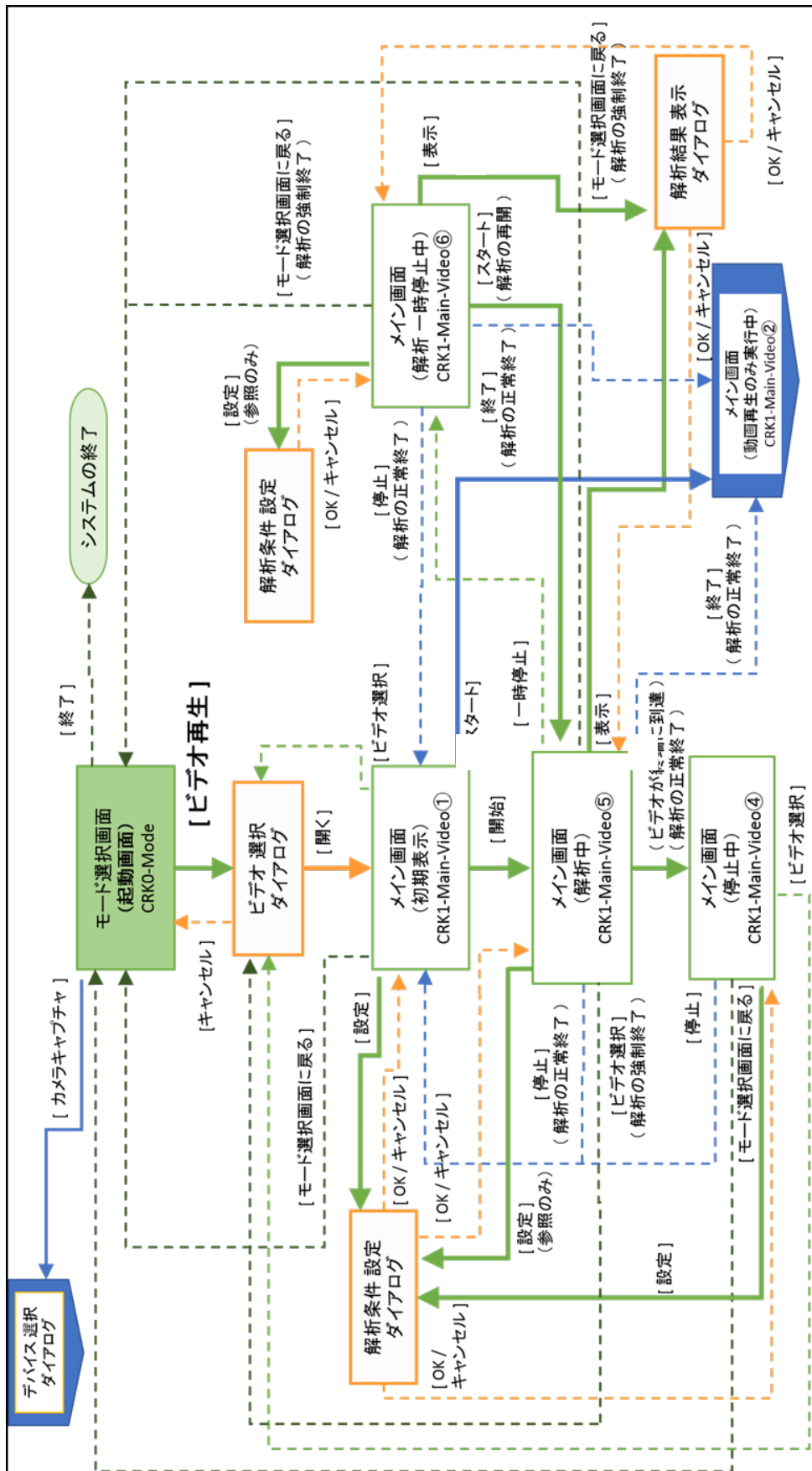


図 2-4 チェレンコフ光評価プログラムの画面遷移(ビデオ再生モード時：画像解析中)

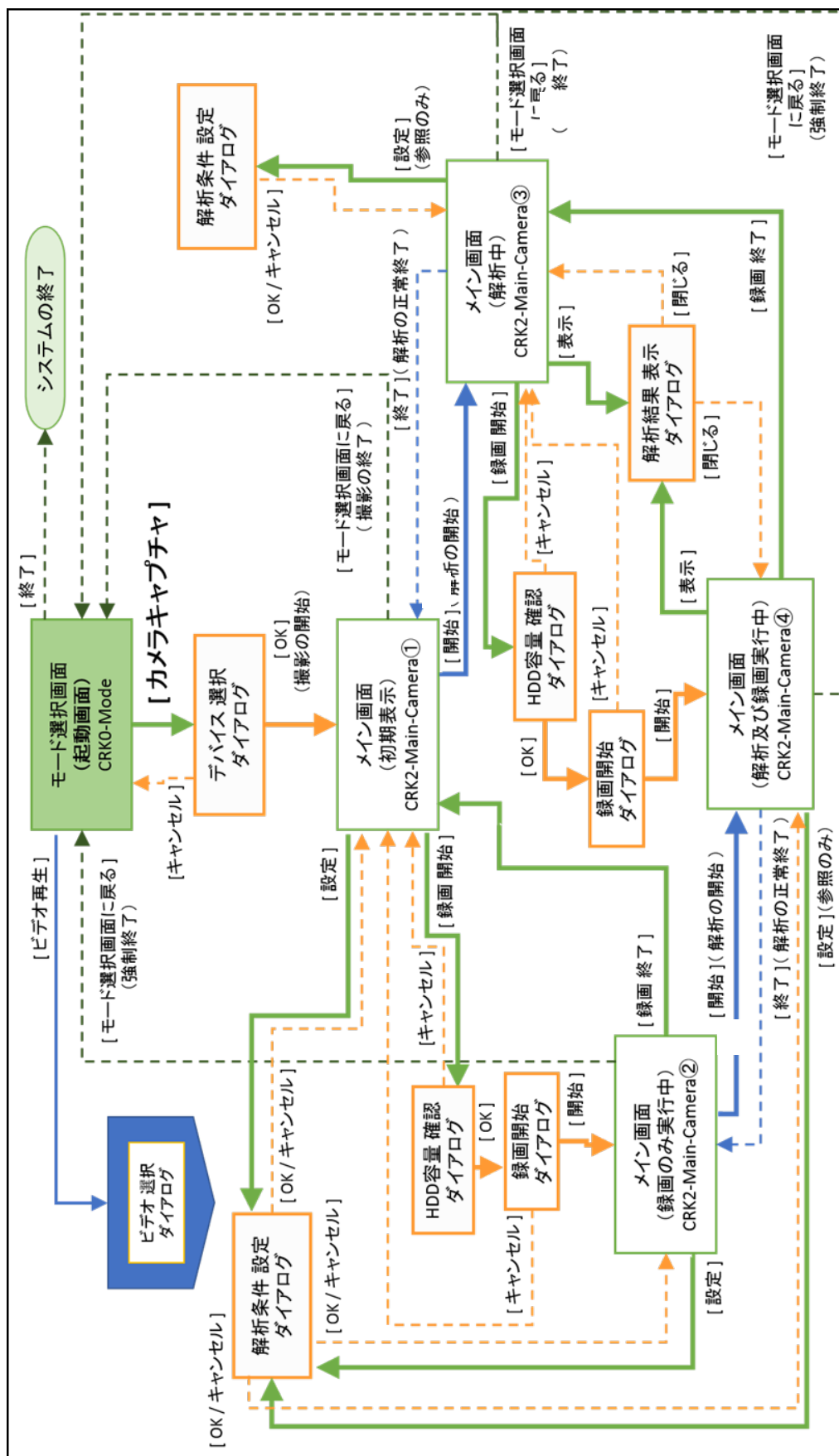


図 2-5 チェレンコフ光評価プログラム画面遷移(カメラチャモード時)

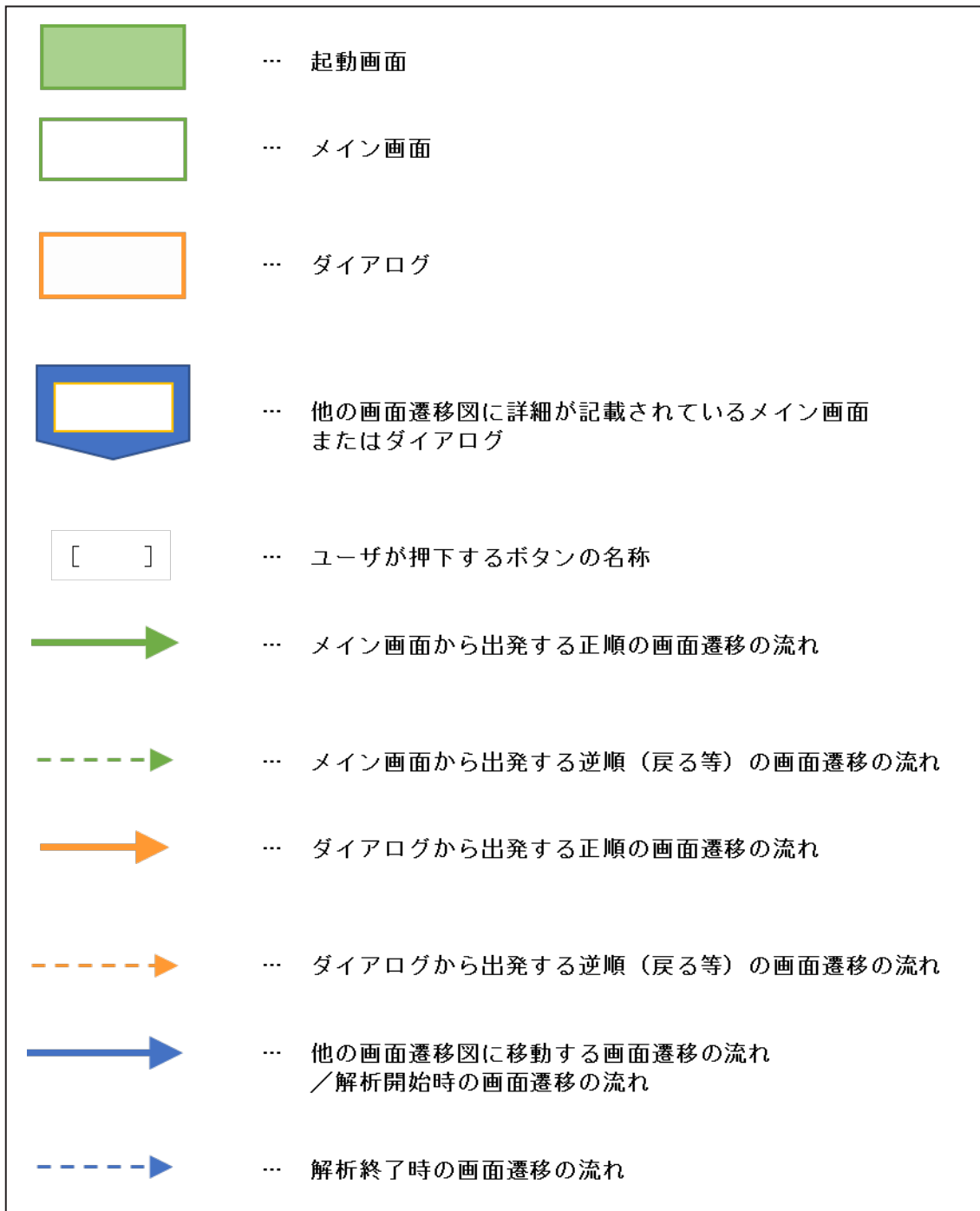


図 2-6 チェレンコフ光評価プログラムの画面遷移図の凡例

解析条件の設定

解析周期
 [sec]
 ☐ 規定値として保存する

解析範囲の画面表示

解析範囲
 矩形領域 始点(左上隅)の座標
 X座標 [pixel]
 Y座標 [pixel]
 ☐ 規定値として保存する

矩形領域の寸法
 幅 (X軸方向) [pixel]
 高さ (Y軸方向) [pixel]
 ☐ 規定値として保存する

図 2-7 解析条件設定ダイアログ

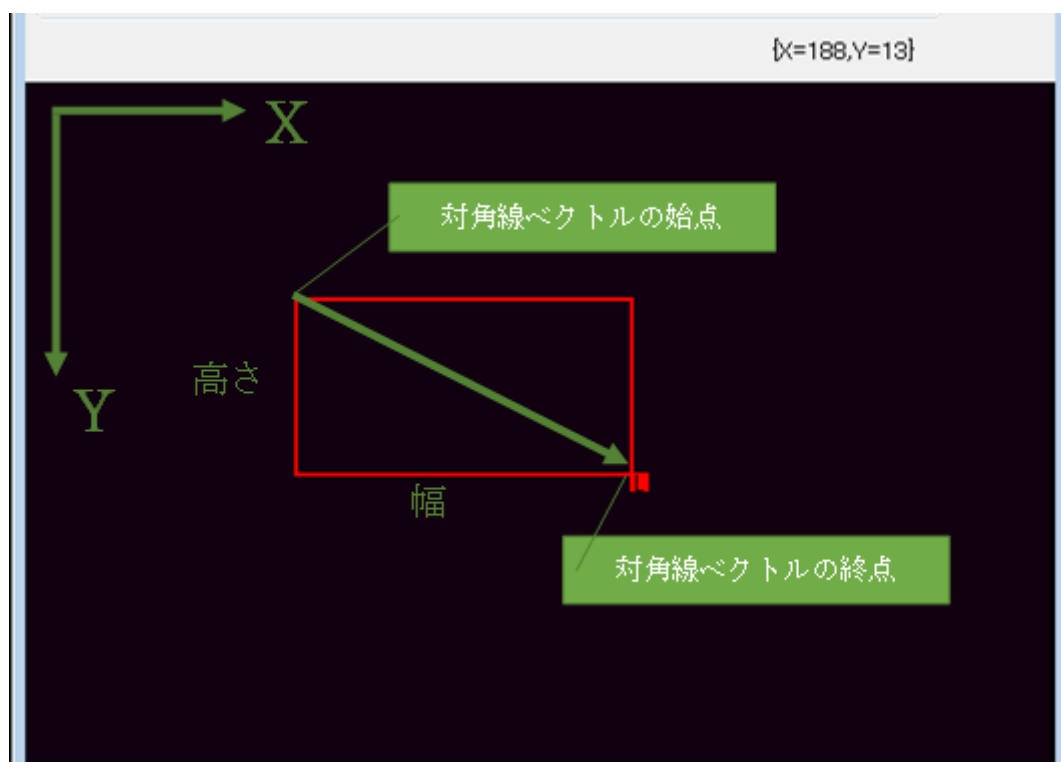


図 2-8 解析範囲の設定方法



図 2-9 解析結果表示ダイアログ

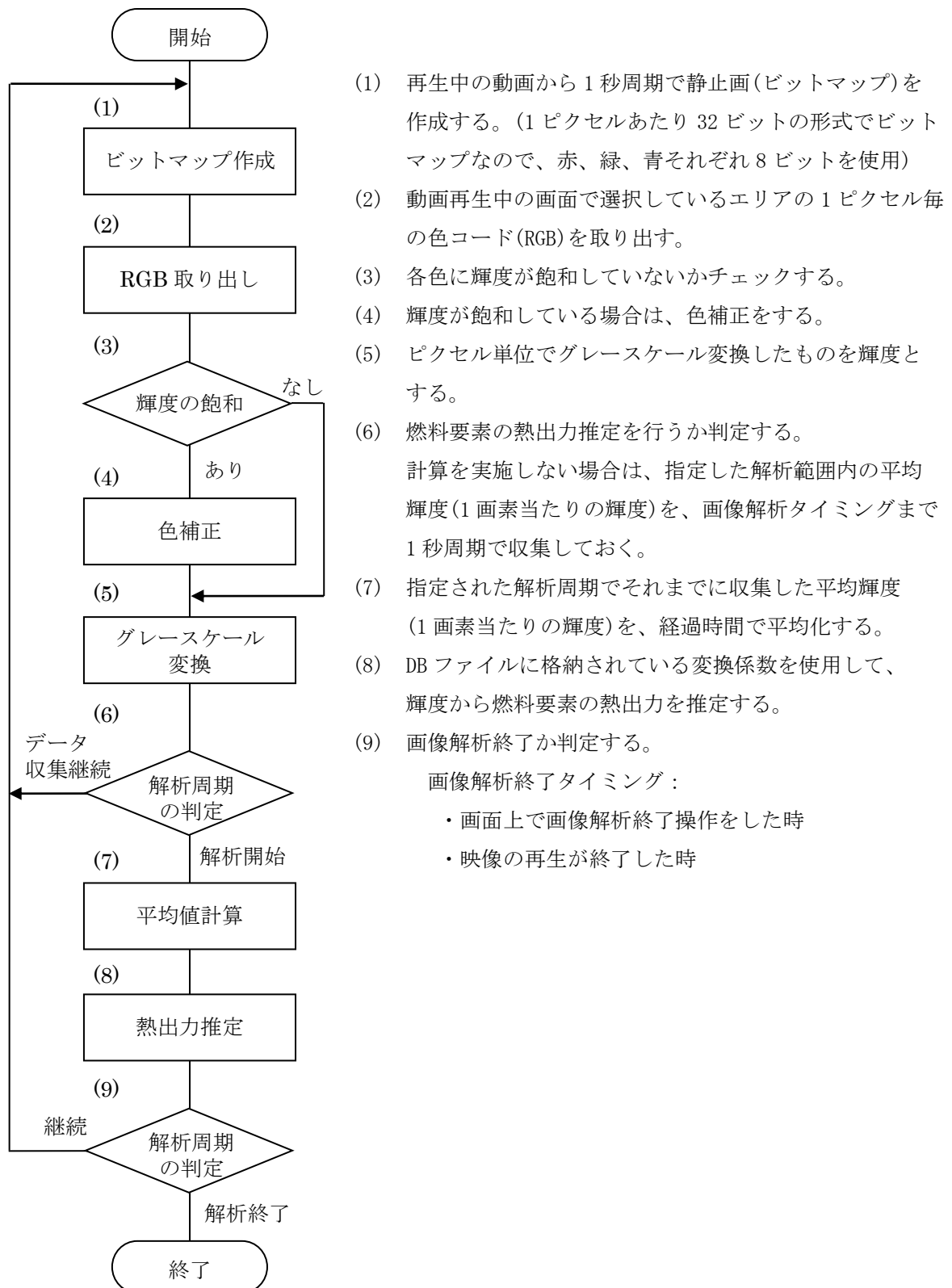


図 2-10 画像解析処理フロー

3. 燃料要素の熱出力推定用データベース

3.1. 概要

チェレンコフ光の画像情報と燃料要素熱出力の評価を行うため、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、KUR を対象としデータベースを作成した。

3.2. チェレンコフ光観測画像の輝度

KUR においてチェレンコフ光観測時に取得した画像から、JAEA-Technology 2014-028(チェレンコフ光観測の原子炉計測への適用(1))^[5]に示すチェレンコフ光観測画像の解析プログラムを使用して炉心位置「ほ-3」に装荷された燃料要素におけるチェレンコフ光の輝度を抽出した。KUR の炉心構成(燃料要素の配置)^[7]を図 3-1 に、原子炉熱出力上昇時における燃料要素「ほ-3」の輝度の変化を図 3-2 に示す。この結果、原子炉熱出力の上昇とともに輝度は比例して上昇することがわかった。

3.3. チェレンコフ光子数の計算

文献^[5]で報告した計算手法を用いて、KUR の燃料要素の熱出力に対する燃料要素周囲のチェレンコフ光子数を算出した。燃料要素周囲領域で発生するチェレンコフ光子数の計算体系及び計算結果をそれぞれ図 3-3 と図 3-4 に示す。この結果、チェレンコフ光子数と燃料要素「ほ-3」の熱出力には良い線形性があることが確認できた。

3.4. 変換係数

KUR の燃料要素を対象とし以下の変換係数を求めた。

(1) 輝度からチェレンコフ光子数への変換係数

原子炉熱出力 5MW における燃料要素「ほ-3」の担う出力における燃料要素周囲のチェレンコフ光子数は 2.00×10^{19} [photons/s] であった。一方、原子炉熱出力 5MW における燃料要素「ほ-3」の輝度は 300 [-] であった。

以上より、チェレンコフ光観測画像より取得した輝度からチェレンコフ光子数への変換係数 f_1 を求めた。

$$\begin{aligned} f_1 &= (\text{燃料要素「ほ-3」のチェレンコフ光子数}) \div (\text{燃料要素「ほ-3」の輝度}) \\ &= 2.00 \times 10^{19} [\text{photons/s}] \div 300 [-] \\ &= 6.67 \times 10^{16} [\text{photons/s}] \end{aligned}$$

(2) チェレンコフ光子数から燃料要素の担う熱出力への変換係数

チェレンコフ光子数は(1)同様、 2.00×10^{19} [photons/s] であり、炉心解析コード(SRAC)^[6]により計算した結果、原子炉熱出力 5MW 時に燃料要素「ほ-3」の担う出力は 178 [kW] であった。

以上より、チェレンコフ光子数から燃料要素の担う熱出力への変換係数 f_2 を求めた。

$$\begin{aligned}
 f_2 &= (\text{燃料要素「ほ-3」の担う熱出力}) \div (\text{燃料要素「ほ-3」のチェレンコフ光子数}) \\
 &= 178[\text{kW}] \div 2.00 \times 10^{19}[\text{photons/s}] \\
 &= 89.0 \times 10^{-19}[\text{kW}/(\text{photons/s})]
 \end{aligned}$$

3.5. データベースの作成

KUR の炉心における各燃料要素の熱出力を推定するためには、燃料要素毎に輝度からチェレンコフ光子数への変換係数 f_1 、チェレンコフ光量から燃料要素の担う熱出力への変換係数 f_2 を求める必要がある。ただし、本システムにおいてはカメラと選択範囲の位置関係や、チェレンコフ光観測画像に見られる陰影による影響は、使用した実験データのみからではモデル化が困難であるため、全領域においてカメラ直下の燃料要素「ほ-3」について計算した f_1 、 f_2 を共通の係数として用いることとした。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
い	G	R-rod	F	F	F	F	SSS	G	G	F : 標準燃料要素
ろ	G	F	F	A-rod	F	B-rod	F	F	G	A~D rod : 粗調整用制御棒及び特殊燃料要素
は	G	G	F	F	Hyd	F	F	LI-PI	G	R rod : 微調整用制御棒及び特殊燃料要素
に	G	G	F	C-rod	F	D-rod	F	G	Pn-2	G : 黒鉛反射対要素
ほ	G	G	F	F	F	F	F	G	Pn-3	PI : プラグ要素
へ	NS	G	G	G	G	G	G	G	Pn-1	NS : 中性子源入りプラグ要素

Hyd : 水圧輸送管
 LI-PI : 長期照射用プラグ
 SSS : 精密制御照射管
 Pn-1~3 : 圧気輸送管

図 3-1 KUR における燃料要素の配置^[7]

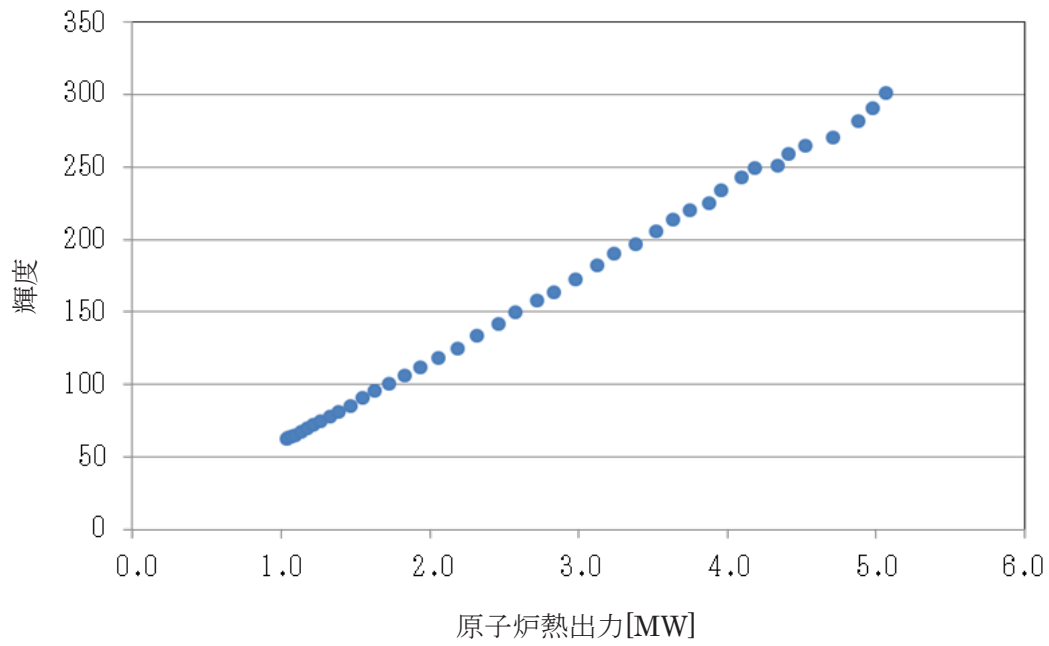
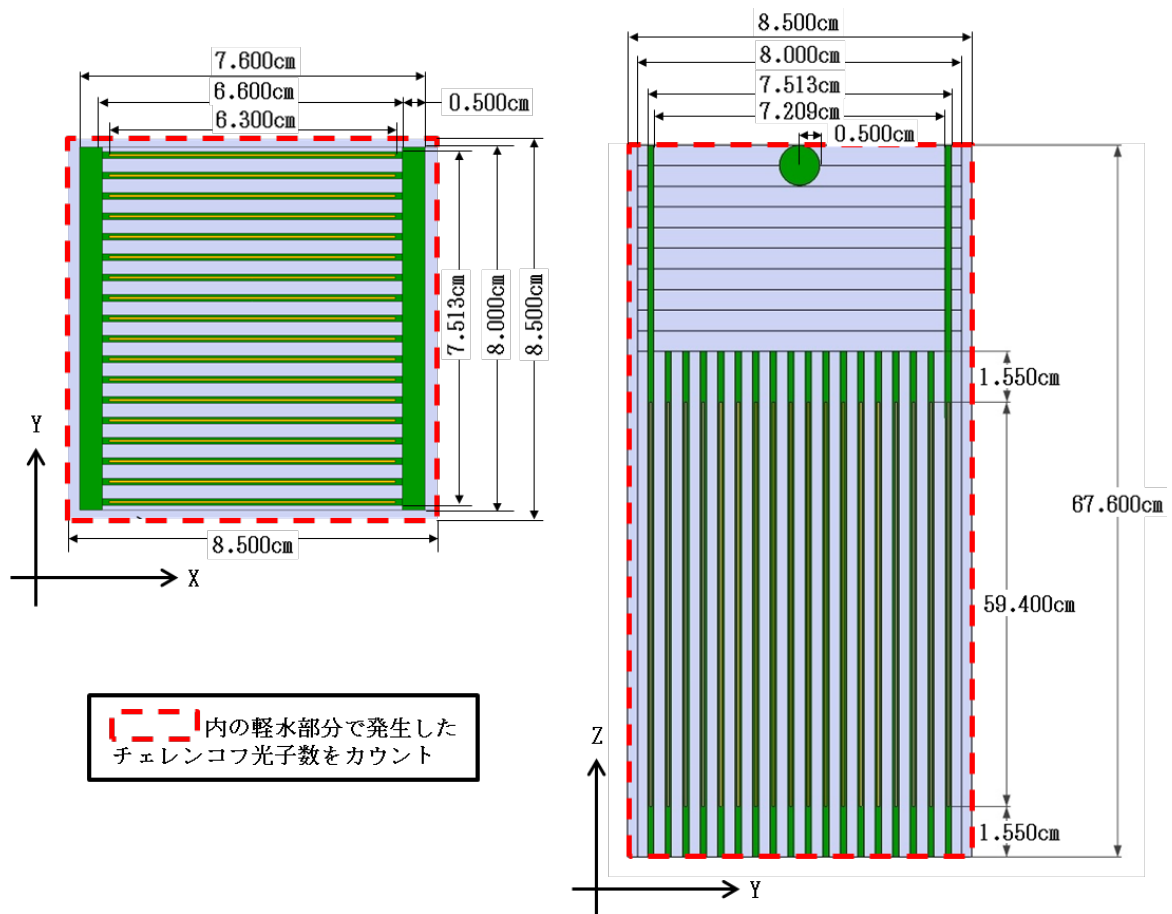


図 3-2 原子炉熱出力 1MW-5MW 変更時の輝度の変化



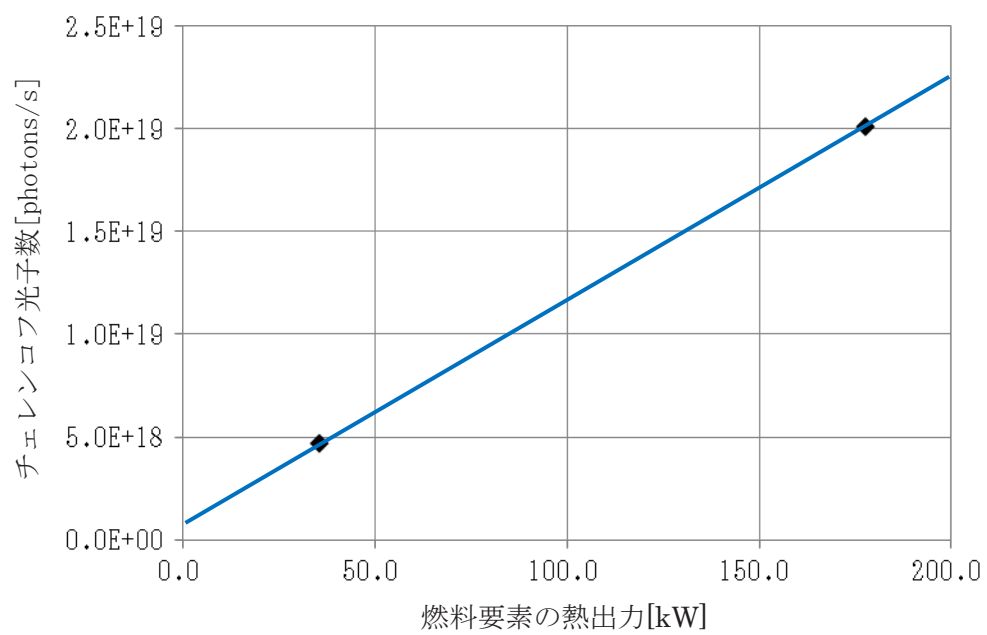


図 3-4 燃料要素の熱出力に対するチェレンコフ光子数の関係

4. チェレンコフ光評価システムの検証試験

4.1. KUR チェレンコフ光観測画像による検証

KUR で取得したチェレンコフ光観測画像を用いて、チェレンコフ光評価システムの検証を行った。検証には、AVI 形式の動画ファイルを使用し、燃料要素「ほ-3、ほ-4、ほ-5、ほ-6、ほ-7」について解析を行った。その結果について図 4-1～図 4-5 及び表 4-1 に示す。

表 4-1 より燃料要素「ほ-3」を解析し得られた変換係数を用いて推定した「ほ-3、ほ-4、ほ-5」の燃料要素における熱出力と、炉心解析コード(SRAC)^[6]により算出した各燃料要素の熱出力は 10% 以内で良い一致を示した。しかし、「ほ-6、ほ-7」の燃料要素においては計算値との差が他の燃料要素よりも大きくなっていた。これは、炉心内の制御棒・照射装置等の配置による陰影が、観測画像の輝度に影響を与えたためと考えられる。今後は、炉心内の制御棒・照射装置等の配置による陰影の影響を低減させるため、観測方法の改良や画像解析時における輝度の補正方法について検討する必要がある。

・検証試験に使用した実験データ

・撮影日	: 2013 年 6 月 27 日
・CCD カメラ	: キュー・アイ社製 AEC-100ZL
・絞り	: F3.4
・原子炉熱出力	: 1MW～5MW 変化時
・ファイル形式	: AVI
・圧縮フォーマット	: MPEG-4 Visual

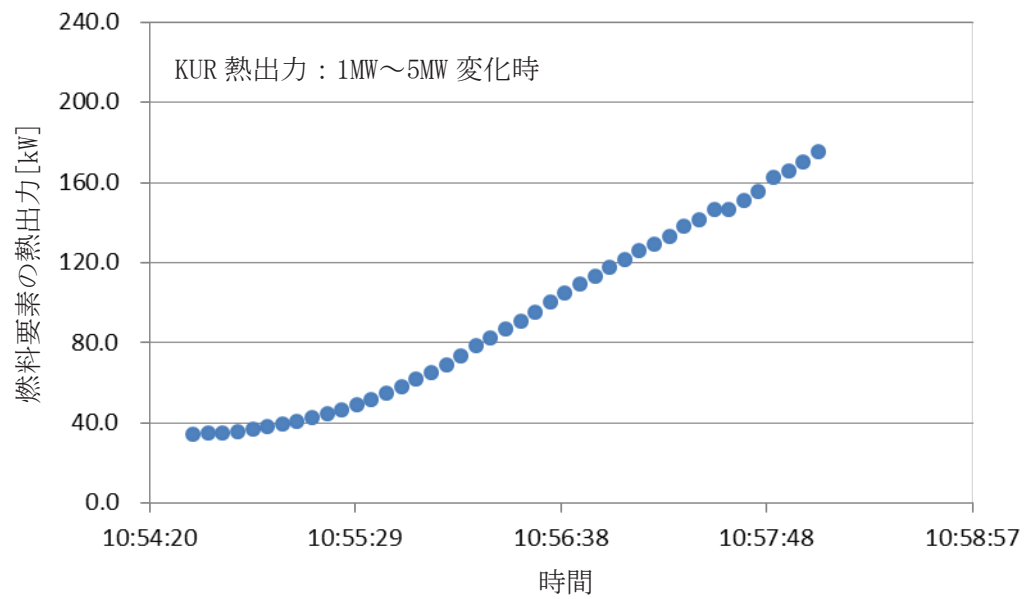


図 4-1 燃料要素「ほ-3」の熱出力の時間変化

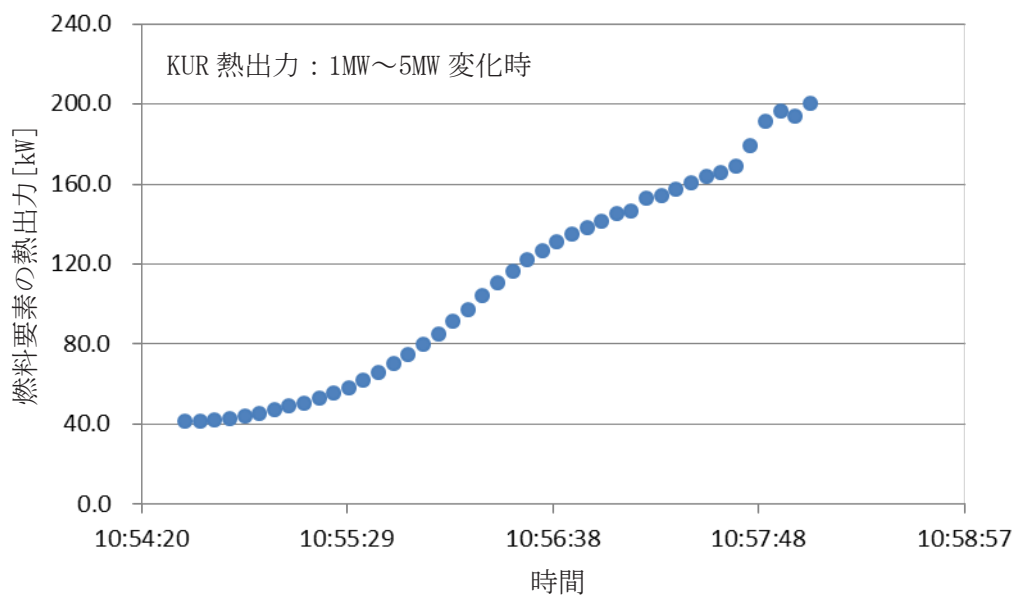


図 4-2 燃料要素「ほ-4」の熱出力の時間変化

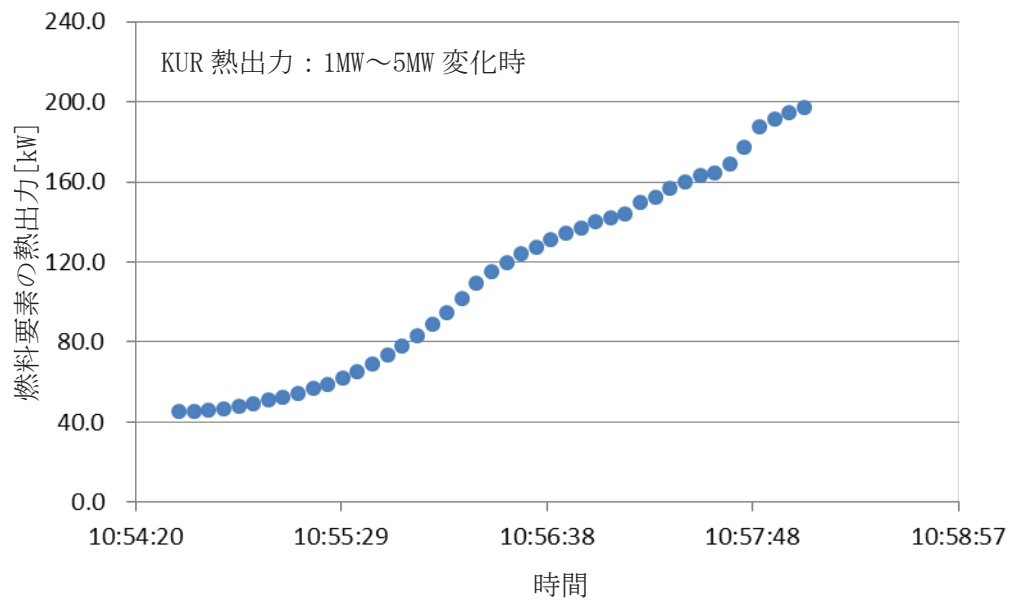


図 4-3 燃料要素「ほ-5」の熱出力の時間変化

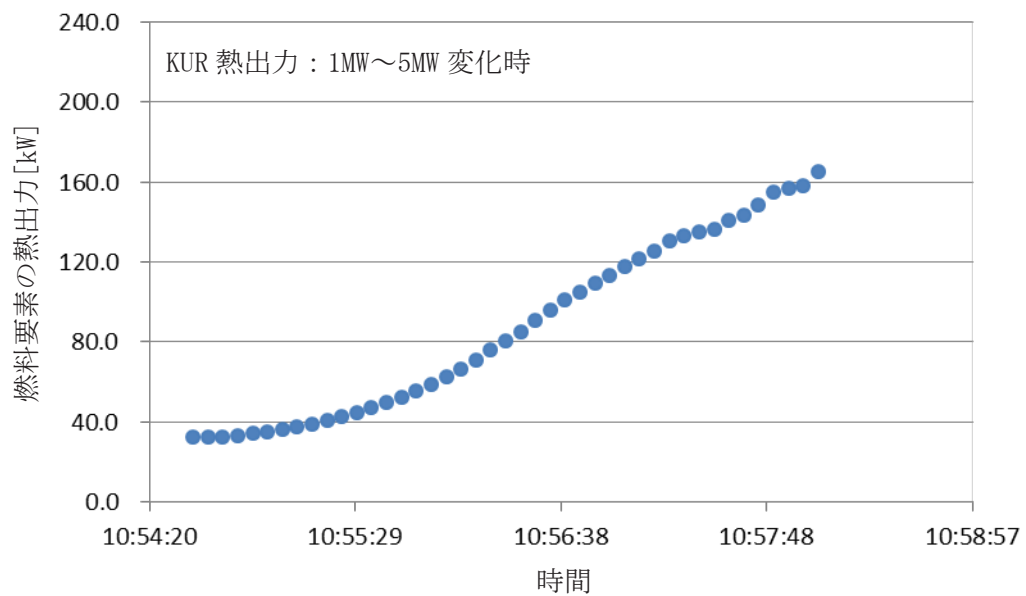


図 4-4 燃料要素「ほ-6」の熱出力の時間変化

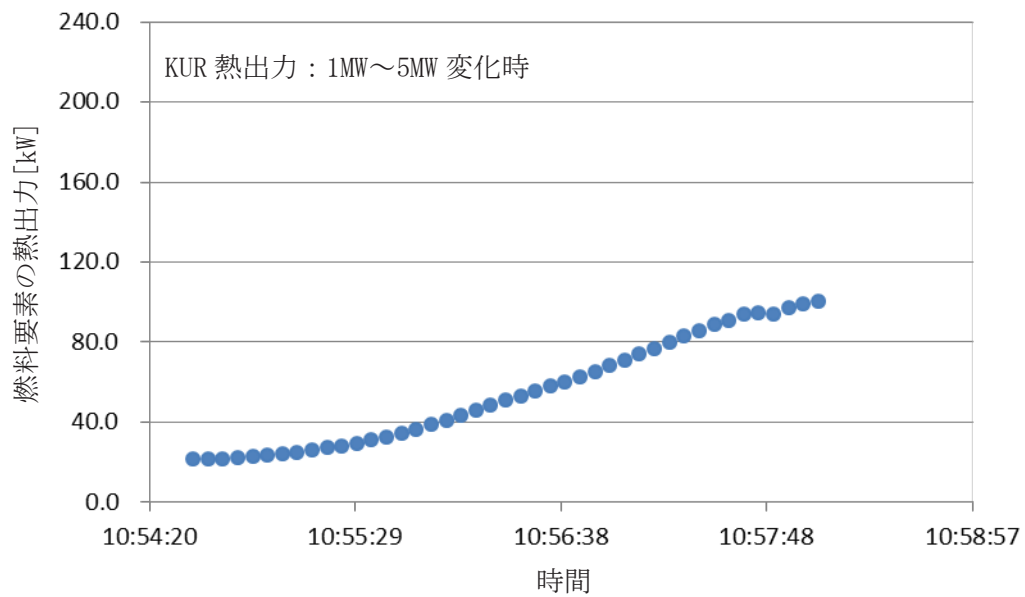
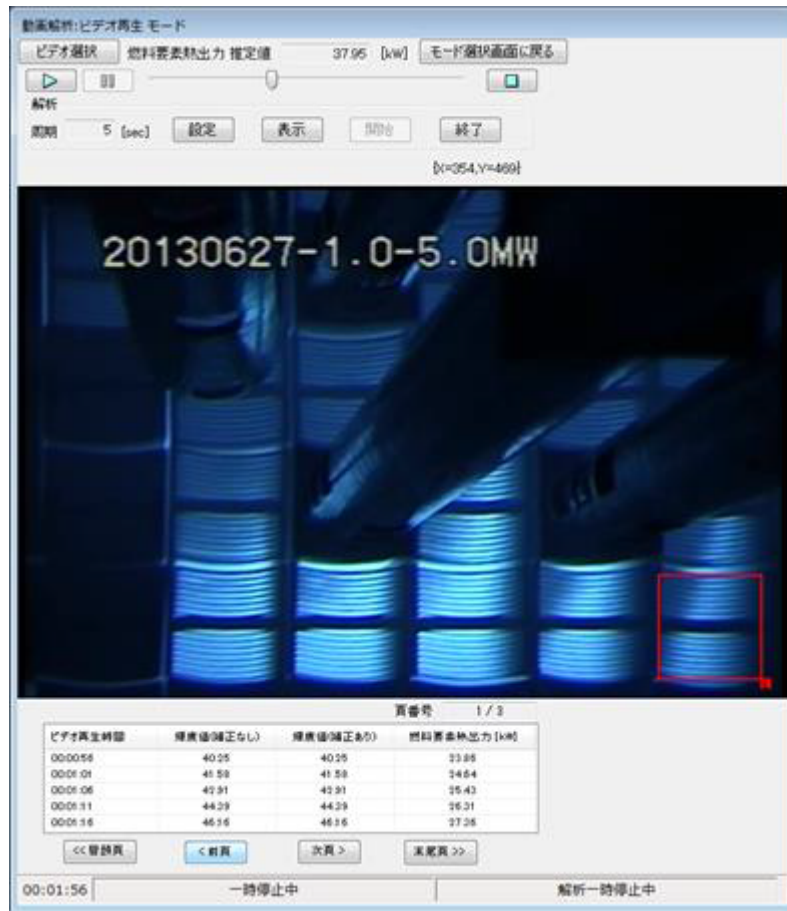


図 4-5 燃料要素「ほ-7」の熱出力の時間変化

表 4-1 推定値と計算値の比較

	原子炉熱出力 [MW]	燃料要素熱出力[kW]		推定値 / 計算値
		推定値	計算値	
ほ-3	1.0	34.3	35.7	0.96
	5.0	175.2	178.0	0.98
ほ-4	1.0	41.2	40.8	1.01
	5.0	200.0	203.3	0.98
ほ-5	1.0	44.8	41.3	1.09
	5.0	196.7	205.4	0.96
ほ-6	1.0	31.9	38.4	0.83
	5.0	164.9	190.8	0.86
ほ-7	1.0	21.2	31.1	0.68
	5.0	100.3	154.6	0.65

計算値：炉心解析コード(SRAC)^[6]による計算

5. 使用済燃料プールへの適用

既存軽水炉(PWR 及び BWR)の使用済燃料集合体近傍のチェレンコフ光観測画像による、使用済燃料集合体の燃焼度推定について検討する。

使用済燃料集合体におけるチェレンコフ放射は、核燃料物質内の核分裂生成物から放出される γ 線と β 線に起因している。よって対象とする使用済燃料集合体について、これまでの燃焼履歴及び冷却日数から γ 線及び β 線発生数を推定することが可能である。これらの線源情報からシミュレーションにより、チェレンコフ放射に伴い放出されるチェレンコフ光子数を推定することができる。そのため本システムと同様に、輝度から対象とする使用済燃料集合体における燃焼度情報に換算するデータベースを作成することで、使用済燃料集合体の燃焼度推定が可能である見通しを得た。

今後、輝度から対象とする使用済燃料集合体における燃焼度情報に換算するデータベースを作成するために、以下の燃焼度及び冷却期間についてチェレンコフ光子数を算出する。

- ・燃焼度[MWd] (新燃料を除く) : 10, 20, 30, 40, 50, 60
- ・冷却期間[年] : 0, 1, 3, 5, 7, 10

作成したデータベースを用いて、チェレンコフ光観測画像から輝度を抽出し、使用済燃料集合体の燃焼度を推定するチェレンコフ光評価システムの試作を行う。

6. まとめ

本研究では、KUR において運転中の燃料要素から放出されるチェレンコフ光観測画像から各燃料要素の熱出力を推定できるチェレンコフ光評価システムの設計・試作を行い、KUR で取得したチェレンコフ光観測画像を用いて検証試験を行った。また、使用済燃料プールへの適用についても検討した。得られた結果は以下の通りである。

(1) システムの設計・試作

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チェレンコフ光観測画像を取得し、文献^[5]で報告したチェレンコフ光画像の解析プログラムを使用して抽出した輝度から燃料要素の熱出力を推定するプログラムと、抽出した輝度から燃料要素の熱出力へ変換する係数を格納したデータベースを作成した。本研究では、KUR の燃料要素「ほ-3」を解析し得られた結果を共通の変換係数として用いることとした。

(2) 検証試験

KUR の燃料要素「ほ-3」を解析し得られた変換係数を用いて推定した各燃料要素の熱出力と、炉心解析コード(SRAC)^[6]により算出した各燃料要素の熱出力が概ね良い一致を示した。なお、一部の燃料要素においては推定値と計算値との差が大きくなることから、観測方法の改良や画像解析時における輝度の補正方法について検討する必要があることがわかった。

(3) 使用済燃料プールへの適用

既存軽水炉(PWR 及び BWR)の使用済燃料集合体近傍のチェレンコフ光観測画像による、使用済燃料集合体の燃焼度の推定は、使用済燃料集合体における燃焼度情報に変換するデータベースを作成することにより可能である見通しを得た。今後、使用済燃料集合体近傍のチェレンコフ光観測画像による、使用済燃料集合体の燃焼度を推定する評価システムへの適用を図る。

謝 辞

本研究開発成果は、平成 22 年度から開始した「京都大学原子炉実験所共同利用研究」の試験結果を活用し、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」への適用性を評価したものである。

本研究開発の実施にあたり、大洗研究開発センター 荒木政則副所長(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、KUR での試験データの取得及び解析にあたっては、京都大学原子炉実験所技術室 藤原靖幸氏、張俚氏、京都大学原子炉実験所 高橋佳之助教、伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 石塚龍雄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、佐野忠史、本間亮平、木村伸明、大塚紀彰、小菅史明、中島 健、土谷邦彦, 「チェレンコフ光観測の原子炉計測への適用(1)― チェレンコフ光量による原子炉出力の推定 ―」, JAEA-Technology 2014-028, 56p.
- [6] Keisuke OKUMURA, Teruhiko KUGO, Kunio KANEKO and Keichiro TSUCHIHASHI, “SRAC2006 : A Comprehensive Neutronics Calculation Code System, ” JAEA-Data/Code 2007-004 (2007), 313p.
- [7] 京都大学原子炉実験所 施設・設備.
http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/KURdiv/info_kur.html (アクセス日 : 2015. 04. 22).

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	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角速度	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
放射線強度	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	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

