

使用済燃料ピットの水温および水位の簡易評価ツール - Pit Calculator - の開発

Development of Simple Evaluation Tool for Water Temperature and Water Level of
Spent Fuel Pit - Pit Calculator -

柳 千裕 (Chihiro Yanagi) *¹ 村瀬 道雄 (Michio Murase) *¹

要約 福島第一原子力発電所の事故以前から、使用済燃料ピット (SFP) の浄化冷却設備停止時におけるピット水の温度上昇を適切にかつ簡便に予測できる手法を開発することを目的として、発熱源である崩壊熱の予測計算とピット水面から空気への蒸発熱伝達の計算、CFDソフトウェアを用いたピット水の3次元熱流動解析を実施してきた。福島第一原子力発電所の事故以降は、全交流動力電源喪失時におけるピット水の水位低下にもこの予測を拡張した。3次元熱流動解析は長い処理時間を要するが、この3次元流動解析結果からSFP水温がほぼ均一であることが分かり、ピット水を一領域 (1R) としても平均水温を正確に得られる。この解析結果を踏まえ、水温と水位を予測するツール“Pit Calculator”を開発した。

キーワード 使用済燃料ピット, 使用済燃料プール, 水温, 水位, 全交流動力電源喪失, 3次元解析, 一領域計算モデル

Abstract Before the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, we had already started to develop a method to predict the water temperature increase in the Spent Fuel Pit (SFP) adequately and simply during the shutdown of cooling systems. In these serial studies, we have carried out prediction of decay heat, calculation of evaporation heat flux from the water surface to the air and three dimensional (3D) thermal hydraulic computations of the SFP water using the computational fluid dynamics (CFD) software. After the accident, we extended the method capability to predict the water level decrease in the SFP during loss of all AC power supplies. 3D computations require a long computing time and its computed results showed that water temperatures were almost uniform outside the rack. This result indicated that a prediction system using one region (1R) calculation model might be able to obtain an average water temperature accurately. From these results, we had developed a simple evaluation tool for water temperature and water level of SFP named 'Pit Calculator'.

Keywords spent fuel pit, spent fuel pool, water temperature, water level, loss of all AC power supplies, three dimensional analysis, one region calculation model

1. はじめに

原子力発電所の使用済燃料ピット (SFP) には通常、使用済燃料集合体からの崩壊熱を除去するため2系統の浄化冷却設備が備わっており、ピット水を一定水温に保っている。また、ピット水面の上方には、水面からのエアロゾル粒子の拡散を抑制する目的で空気流を形成する換気空調系が設けられている。SFPの概念図を図1に示す。

SFPの浄化冷却設備の保守点検等に伴う停止に

備え、実機ではピット水温が管理値に達するまでの時間評価を行っているが、実測値とのかい離が大きいと保守点検時間の確保に支障を生じる。

福島第一原子力発電所の事故以降、ピット水の冷却機能停止後の照射済燃料の健全性評価についての重要性が増し、いくつかの解析がなされている⁽¹⁾⁽²⁾。

原子力安全システム研究所 (以下「INSS」という) では、福島第一原子力発電所の事故以前から、SFPの浄化冷却設備停止時におけるピット水の温度上昇を適切にかつ簡便に予測できる手法を開発すること

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

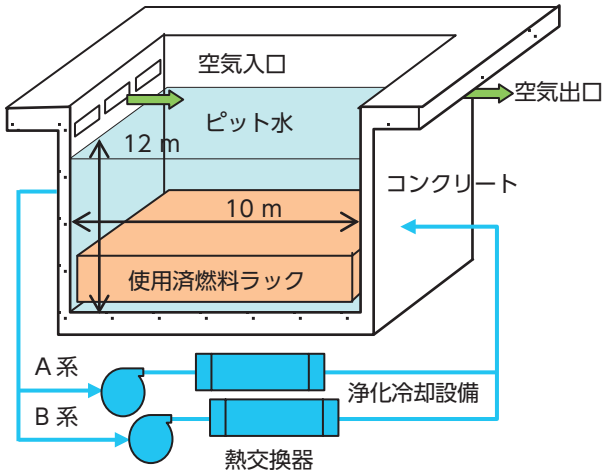


図1 使用済燃料ピットの概念図

を目的として、発熱源である崩壊熱の予測計算とピット水面から空気への蒸発熱伝達の計算、CFD（数値流体力学）ソフトウェアFLUENT6.3.26を用いたピット水の3次元熱流動解析を実施した⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。

この3次元熱流動解析には数日以上の長い処理時間を要するが、この3次元熱流動解析結果からピットの水温がほぼ均一であることが分かり、ピット水を一領域としても平均水温を正確に得られることがわかった⁽⁴⁾。

この解析結果を踏まえSFPの水温と水位を予測するツール“Pit Calculator”を開発した。

福島第一原子力発電所の事故以降は、浄化冷却設備とともに換気空調系も停止する全交流動力電源喪失時におけるピット水の水位低下にもこの予測を拡張し⁽⁶⁾⁻⁽⁷⁾、Pit Calculatorに反映した。

本解説では、Pit Calculatorの開発シナリオとその概要について述べる。

2. 開発シナリオと予測手順の概要

図2にPit Calculatorの開発シナリオの概要を示す。

浄化冷却設備停止中のSFPの水温を予測する際の重要な不確実性は、使用済燃料からの崩壊熱（発熱）と水面から換気空気への蒸発熱伝達（放熱モデル）である。

2.1. 崩壊熱の予測方法

SFPでは、発熱源である崩壊熱自体は計器等を用いた監視はなく、発熱量を計算できる計測も実施し

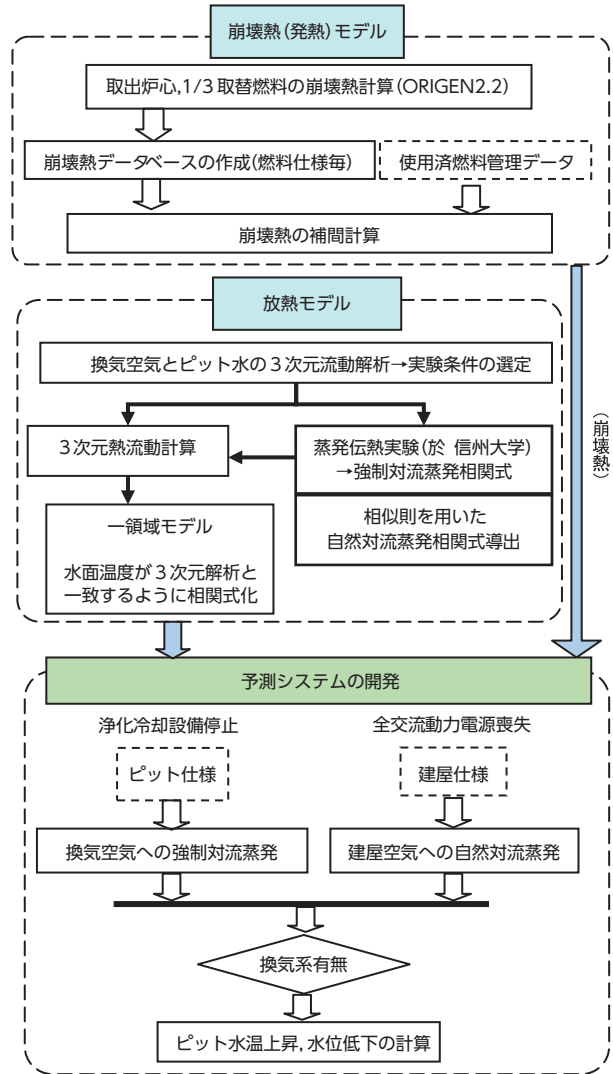


図2 Pit Calculatorの開発シナリオの概要

ていない。既存の崩壊熱計算式は、原子炉運転時間と原子炉停止以降の経過時間（冷却時間）の関数として表せるが、加圧水型（PWR）燃料なのか沸騰水型（BWR）燃料なのか、最大燃焼度（GWd/t）はいくらなのかといった燃料の仕様の影響は考慮されていない場合が多い。本開発においては、使用済燃料の崩壊熱を精度よく予測するために、燃料仕様を考慮でき一般公開されている燃焼計算ソフトウェアORIGEN2.2⁽⁸⁾を用いた⁽⁶⁾。

Pit Calculatorでは、発電事業者が保有する使用済燃料管理データから崩壊熱を補間計算できるような崩壊熱データベースを燃料仕様毎に作成した。

現時点で保有する崩壊熱データベースは、PWR用燃料でウラン燃料集合体を対象とし、最大燃焼度は48GWd/tと55GWd/tを対象としている。また、計画外停止した運転サイクルから取り出された燃料にも対応できるように、原子炉停止後の冷却時間のほ

か、原子炉運転期間をパラメータとして崩壊熱データベースを作成している。崩壊熱計算の妥当性は、中性子束の燃焼度依存性、冷却期間依存性を以って確認した。

2.2. 蒸発熱流束の予測方法

外部からの交流電源喪失時には、浄化冷却設備は一部プラントでは停止するが、換気空調系は非常用電源により運転可能である。つまりSFP建屋内は強制対流空気流れである。一方、全交流動力電源喪失時には換気空調系も停止するためSFP建屋内は自然対流空気流れとなる。

強制対流空気流れに対する蒸発熱流束の相関式は、信州大学との共同研究による実験結果から導出⁽³⁾し、実機データで検証⁽⁵⁾を行った。自然対流空気流れに対する蒸発熱流束の相関式は相似則を用いて導出⁽³⁾し、福島第一原子力発電所データで検証⁽⁶⁾を行った。

2.3. ピット水の3次元熱流動解析

浄化冷却設備停止時のSFPの熱損失と水温を評価することを目的に、CFDソフトウェアFLUENT6.3.26を用いてピット水の3次元熱流動解析を行った。水面から換気空気への蒸発熱流束の相関式は、上述の強制対流空気流れで導出した相関式を用いた。図3に解析に使用した計算モデルの概要図⁽⁴⁾を示す。底面部分のコンクリートおよびコンクリート外面は断熱扱いとし、全計算セル数は約75,000である。ピット内のラックは実機と同じ3×6の18領域に区分けしている。

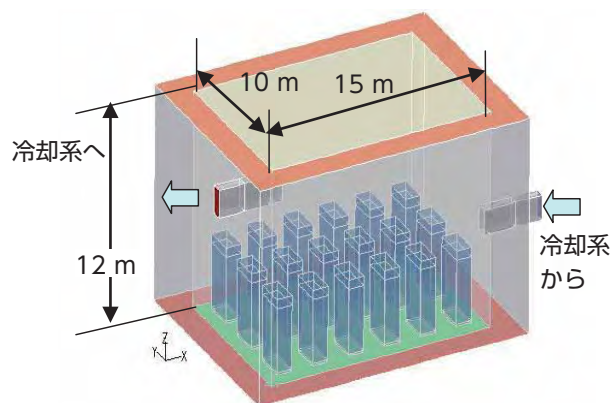


図3 計算モデルの概要図

図4に、崩壊熱が5MW（4ループPWR型原子炉一炉心分の193体の燃料集合体が約1ヶ月冷却された場合の崩壊熱に相当）の場合の浄化冷却設備停止10時間後の水温分布⁽⁴⁾を示す。この図から、ラック外側では水面近傍とコンクリート壁および底部近傍を除いてほぼ一様な温度分布であることがわかる。また、水面における温度差は1℃以内であり、ほぼ一様な分布であるといえる。このことから、ピット水を一領域として質量保存式とエネルギー保存式を解く単純な領域モデルにより精度良く平均水温を得ることができることを示している。

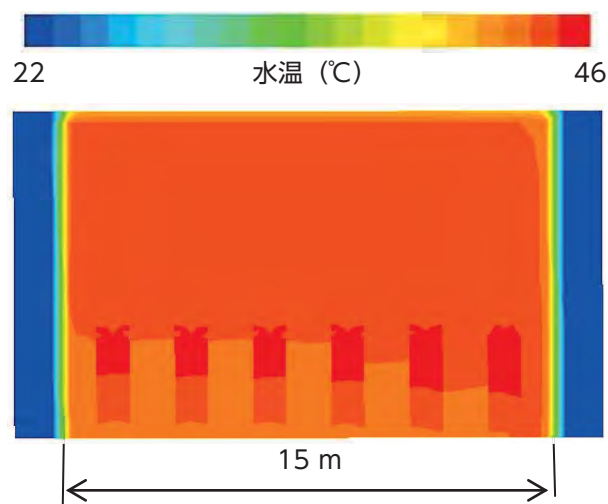
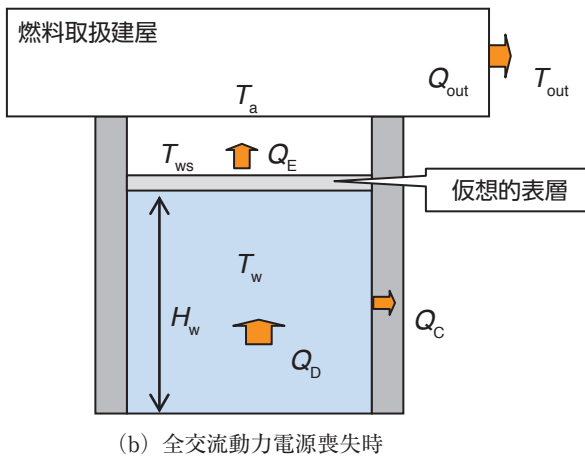
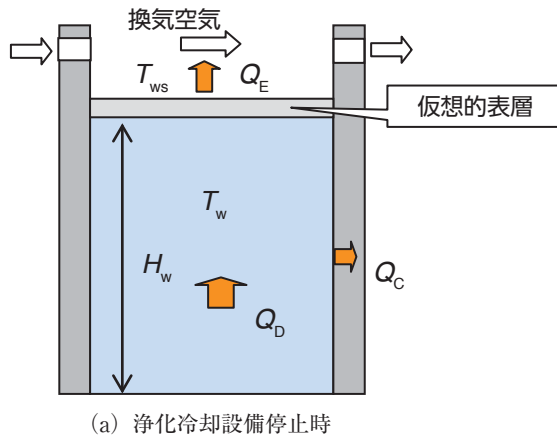


図4 水温分布の一例（崩壊熱5MW）
垂直断面中央（ $Y = 5 \text{ m}$ ）

3. 一領域計算モデル

3次元熱流動解析結果に基づき一領域計算モデルの作成⁽⁷⁾を行った。図5にそのモデルを示す。図5(a)は、浄化冷却設備停止時で換気空気が流れている強制対流空気流れ下で使用するモデルである。図5(b)は、全交流動力電源喪失時で換気空気が流れていない自然対流空気流れ下で使用するモデルである。解析結果から水面温度は平均水温より低いため、モデル中にある仮想的表層を設けた。これは、蒸発による空気中への伝熱量 (Q_E) [kW] を計算するために導入したものである。なおこのモデルではコンクリートへの伝熱量 (Q_C) [kW] によりコンクリート温度を計算し、コンクリートの耐温度健全性も評価できるようにした。計算ではピット水に対する熱バランス式から平均水温 (T_w) [℃] を算出し、ピット水に対する質量バランス式から水位 (H_w) [m] を算出する。

一領域計算モデルの有効性は、3次元熱流動解析結果と比較により評価⁽⁷⁾を行った。図6にその結果を示す。



Q_D : 崩壊熱 [kW]	T_{out} : 外気温度 [°C]
Q_{out} : 建屋外への放熱量 [kW]	T_w : 平均水温 [°C]
T_a : 建屋内空気の温度 [°C]	T_{ws} : 水面温度 [°C]

図5 一領域計算モデル

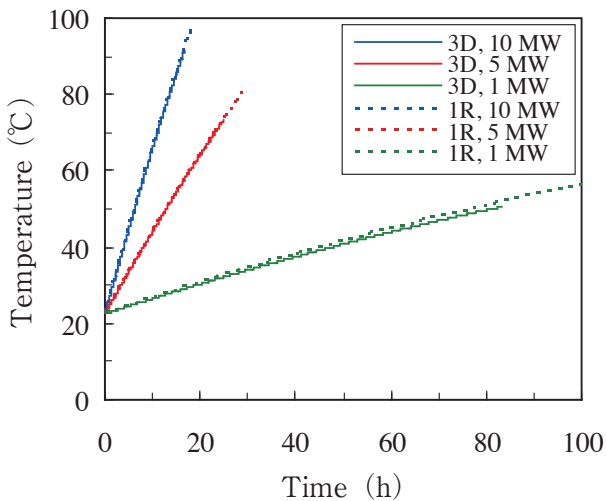


図6 一領域計算モデルと3次元熱流動計算との比較

一領域計算モデル (1R) による平均水温と3次元熱流動解析 (3D) による平均水温は良い一致を示している。計算時間が3Dでは数日から数週間費やすのに対し1Rでは数秒程度であることから、発電所の現場で活用するには一領域計算モデルが有効である。

4. Pit Calculatorの開発

4.1. Pit Calculatorの特徴

これまで得られた知見から、所期の目的であるピット水の温度上昇を適切にかつ簡便に予測できるツールPit Calculatorを開発した。これには以下の特徴を有している。

- ① 断熱を仮定してピット水の温度上昇を計算するのではなく、実験や解析結果に基づいて空気への放熱やコンクリートへの伝熱を考慮し、ピット水の温度上昇や水位低下を計算。
- ② ピット水を一領域で模擬することにより、パソコン上で、温度上昇や水位変化を計算。(高性能コンピュータが不要)
- ③ 浄化冷却設備停止時および換気空調系停止時のピットの水温上昇や水位変化を計算・グラフ化し、また、デジタル値をエクセル形式でも出力可能。
- ④ 設定した水温や水位に到達する日時を出力する機能を備える。
- ⑤ 崩壊熱は、燃焼計算ソフトORIGEN2.2⁽⁸⁾を用いた計算値をデータシートとして保持することにより、簡易計算が可能。
- ⑥ 運転期間の入力のみで、取出炉心の崩壊熱の時間変化を自動計算。
- ⑦ ピット保管の使用済燃料の体数と冷却時間の2項目のみの入力により、崩壊熱の時間変化を自動計算。
- ⑧ BWRといった他の燃料についても、崩壊熱のデータシートを新たに追加することにより、計算が可能。
- ⑨ 計算対象は、水温が100°Cまで、水位は燃料上部までである。

4.2. Pit Calculatorの入力と出力の概要

図7にPit Calculatorの初期画面を示す。初期画面で「使用済燃料ピット水温計算パラメータ管理」と「使用済燃料貯蔵状況管理」の両項目は、計算を始める前の事前入力項目である。

初期画面中の「使用済燃料ピット水温計算パラメータ管理」をクリックすると図8に示す画面が表示される。

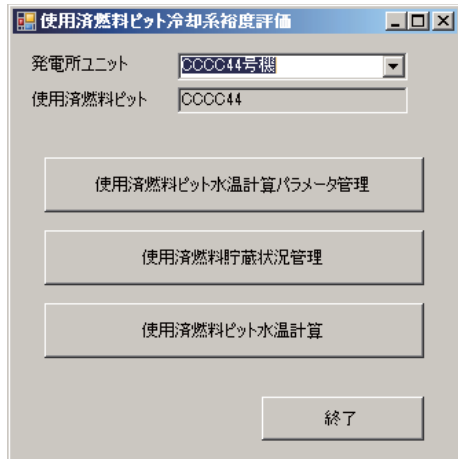


図7 Pit Calculator 初期画面

示される。この画面では、ピットの仕様（縦横長さ・深さなど）、建屋の仕様（換気空調系の流量・温度など）、外気温度といった数値を入力する画面と、物性値（大気圧、比熱など）を入力する画面の2つから構成されている。



図8 「使用済燃料ピット水温計算パラメータ管理」画面

初期画面中の「使用済燃料貯蔵状況管理」をクリックすると図9に示す画面が表示される。この画面では、ピットに保管されている使用済燃料の体数を入

力する画面であり、ピット内の保管体数に変更（燃料取出や搬出など）があれば、入力データの更新が必要である。



図9 「使用済燃料貯蔵状況管理」画面

初期画面中の「使用済燃料ピット水温計算」をクリックすると図10に示す画面が表示される。ここでは、浄化冷却設備の保守点検による計画停止による水温の管理目標値に達するまでの時間的余裕を計算する入力仕様となっている。図11も同じ「使用済燃料ピット水温計算」画面で、ここでは、初期水温を入力、計算終了条件を、「最高水温」、「プール水位」、「計算期間」のいずれかから選択する必要がある。

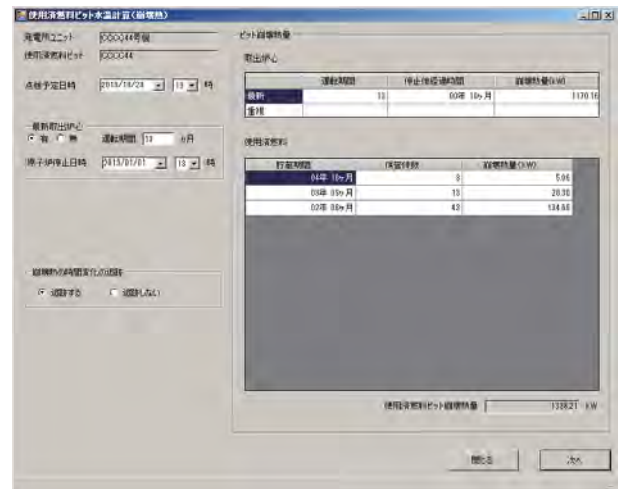


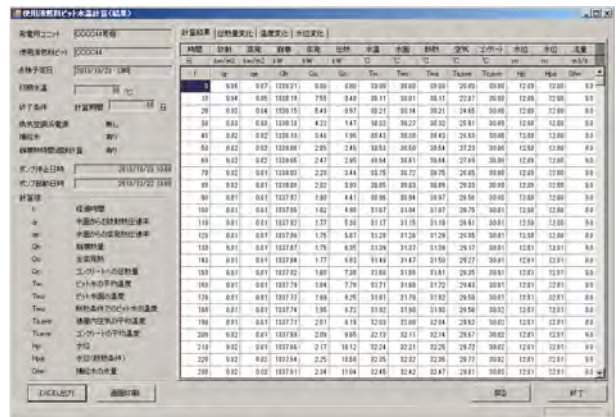
図10 「使用済燃料ピット水温計算」画面 (1/2)

さらに、換気空調系電源の有無を選択する。これは福島第一原子力発電所の事故を踏まえ、全交流動力電源喪失にも対応できるように、初期バージョンからの追加機能である。また、補給水の有無を選択できる機能も追加した。補給水有りを選択した場合は、流量と温度等の入力が必要となる。

計算結果の画面を図12に示す。図12(a)が表形式で出力される計算結果で、CSVファイル形式での保存を可能にしている。図12(b)と図12(c)に示すようにグラフ形式での画面表示も可能である。なお、図12(c)で水位が上昇しているのは補給水の影響である。



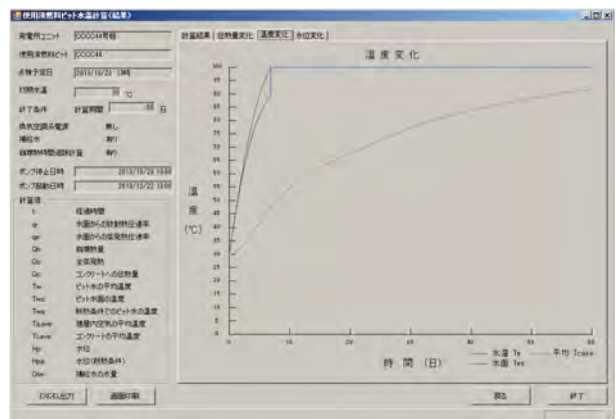
図11 「使用済燃料ピット水温計算」画面 (2/2)



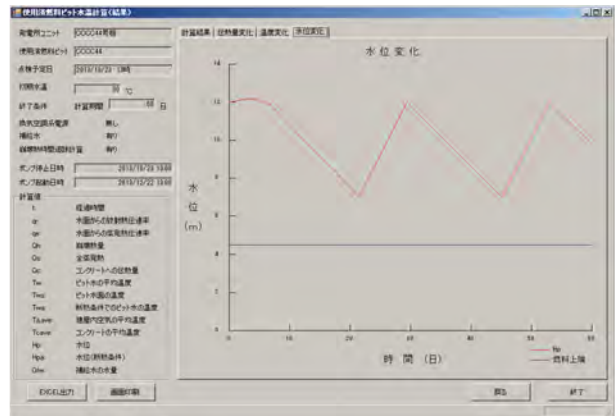
(a) 表形式の計算結果

5. まとめ

福島第一原子力発電所の事故以前からSFPの水温上昇を適切にかつ簡便に予測できる手法を開発することを目的として、発熱源である崩壊熱の予測計算とピット水面から空気への蒸発熱伝達の計算、CFDソフトウェアを用いたピット水の3次元熱流動解析を実施してきた。福島第一原子力発電所の事故以降は、全交流動力電源喪失時におけるピット水の水位低下にもこの予測を拡張した。3次元熱流動解析結果からSFP水温がほぼ均一であることが分かり、ピット水を一領域としても平均水温を正確に得られる。この解析結果を踏まえ、水温と水位を予測するツール“Pit Calculator”を開発した。このツールは、崩壊熱の予測、水温と水位の予測とも明確な要因、つまり、予測条件である燃焼度、相似則に基づいて導出された熱流束関連式により安全側の評価が可能であり、現在、一部の発電事業者とその原子力発電所で試運用がなされている。



(b) 温度変化のグラフ



(c) 水位変化のグラフ

図12 計算結果の画面

文献

(1) Wang, J. R., Lin, H. T., Wang, T. C., Chen, H. C., Yang, J. H., and Shih, C., “MELCOR/SNAP Analysis of Chinshan (BWR/4) Nuclear Power Plant Spent Fuel Pool for the Similar Fukushima Accident,” The 10th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety, Okinawa, Japan, Dec. 14-18, NUTHOS10-1076 (2014).

(2) Zhang, Z., and Liang, T. K. S., “Analysis of the

Loss of Cooling Accident for the Spent Fuel Pool of Nuclear Power Plant Using MELCOR,” The 10th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety, Okinawa, Japan, Dec. 14-18, NUTHOS10-1098 (2014).

(3) 柳 千裕, 村瀬 道雄, 吉田 至孝, 岩城 隆則, 長江 尚史, 小泉 安郎, “高温水から空気流への蒸発熱流束”, 日本機械学会論文集 (B編)

- Vol. 78, No. 786, pp. 157-166 (2012).
- (4) Yanagi, C., Murase, M., Yoshida, Y., Iwaki, T., and Nagae, T., "Evaluation of Heat Loss and Water Temperature in a Spent Fuel Pit," J. Power and Energy Systems, 6 (2) , pp. 51-62 (2012).
 - (5) Yanagi, C., Murase, M., Yoshida, Y., Utanohara, Y., Iwaki, T., and Nagae, T., "Numerical Simulation of Water Temperature in a Spent Fuel Pit during the Shutdown of Its Cooling Systems," J. Power and Energy Systems, 6 (3) , pp. 423-434 (2012).
 - (6) Yanagi, C., Murase, M., Yoshida, Y., and Kusunoki, T., "Prediction of Temperature and Water Level in a Spent Fuel Pit during Loss of All AC Power Supplies," J. Nuc. Science and Technology, 52 (2) , pp. 193-202 (2015).
 - (7) Yanagi, C., and Murase, M., "One-region Model Predicting Water Temperature and Level in a Spent Fuel Pit during Loss of All AC Power Supplies," J. Power and Energy Systems, 7 (1) , pp. 18-31 (2013).
 - (8) S. B. Ludwig, A. G. Croff, Revision to ORIGEN2 - Version 2.2, Transmittal memo of CCC-0371/17, Oak Ridge National Laboratory (2002).