

# 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 - の改良 (その2)

## Second Revision of Pit Calculator

( Simple Evaluation Tool for Water Temperature and Water Level of Spent Fuel Pit )

柳 千裕 (Chihiro Yanagi) \*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することを目的として Pit Calculator を開発し、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適用できるように反映した。その後は使い勝手向上の観点から実際に発電所所員に試用頂き、現場意見を逐次取り入れ改良を重ねてきた。ここでは昨年に引き続き、更なる改良を施したのでその主要な改良内容について述べる。

**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

**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. After the accident, we extended the method capability to predict the water level decrease in the SFP during loss of all AC power supplies. From these development extensions, we developed a simple evaluation tool for water temperature and water level of the SFP named 'Pit Calculator'. After its development, we asked the plant staff to try out and to evaluate this Pit Calculator from the viewpoint of usability improvement. From the opinions of the plant staff, we continued to make second improvements. Here we describe the major improvements.

**Keywords** spent fuel pit, spent fuel pool, water temperature, water level, loss of all AC power supplies

## 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。

原子力安全システム研究所では、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

予測することを目的として、SFPの水温と水位を予測する検討を行い<sup>(1)</sup>、その予測ツールとして“Pit Calculator”を開発した<sup>(2)</sup>。

Pit Calculatorは、解析の対象が使用済み燃料ピットの水温および水位であり、発熱源である使用済み燃料からの崩壊熱の計算モデルとピット水面から空気への放熱である蒸発熱伝達の計算モデルから構成されている。したがって、ピット水温を予測する際の主要な不確かさは、崩壊熱および水面から空気への放熱の予測誤差に起因する。

放熱モデルの構築に際しては、CFD (数値流体力学) 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、ピット水温がほぼ均一とみなせることを確認し、ピット水を一領域で模擬した。また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

\*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

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する。このような放熱モデルとピット水を一領域で模擬することにより、高性能コンピュータを必要とせず、一般のパソコン上で温度上昇や水位変化を簡易計算出来ることなどがPit Calculatorの特徴である。

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、Pit Calculatorに反映した。

2010年度から2011年度にかけて開発した初期バージョン<sup>(2)</sup>の後、使い勝手向上の観点から実際に発電所所員に試用してもらい、2016年度から今日に至るあいだ、現場意見を逐次取り入れ改良を重ねてきた<sup>(3)</sup>。

これまでの改良の一例として、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していたものを、崩壊熱計算精度の向上を図る観点から、ユーザが保持している保管燃料データ（ウラン濃縮度、燃料集合体燃焼度、原子炉停止日時等）を読み込む方式に変更した。

本解説では昨年度からの新規改良内容を中心に述べる。

## 2. Pit Calculatorの2019年度改良

### 2.1 計算パラメータ関連

図1に示す初期画面から「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2に示す画面が表示される。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（建屋容積、換気空調系の送気流量など）といった数値を入力する表と、物性値（大気圧、比熱など）を入力する表、計算間隔などを指定する表の3つから構成されている。

この画面（図2）では、前回、水の比熱に関する倍数項目の追加を行った。これは、燃料集合体の体積分を水で置換した仮定で熱容量の計算を行うと、熱容量 [J/K] は燃料集合体<水であるため、非保守的な計算を実施していることになる。この非保守的な計算を回避するため、水の比熱に倍数（0以上1未満）を掛け合わせるパスを設けた。今回の改良では、プラント毎に熱容量を推定し、水の比熱に対する倍数をプラント毎にデフォルトで設定した。

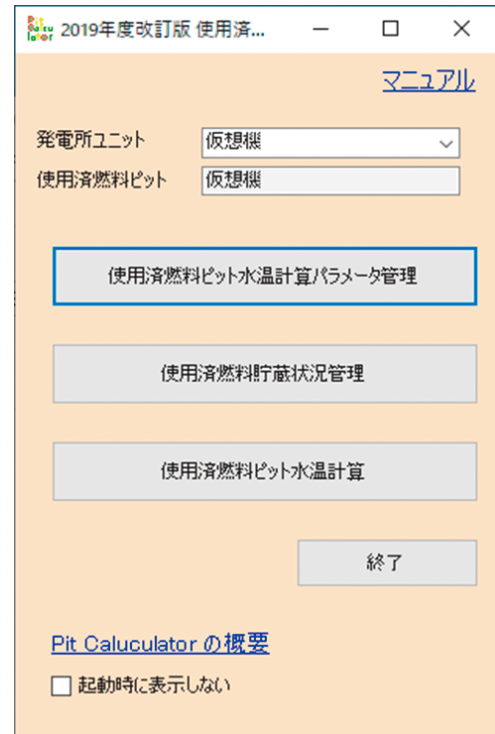


図1 初期画面

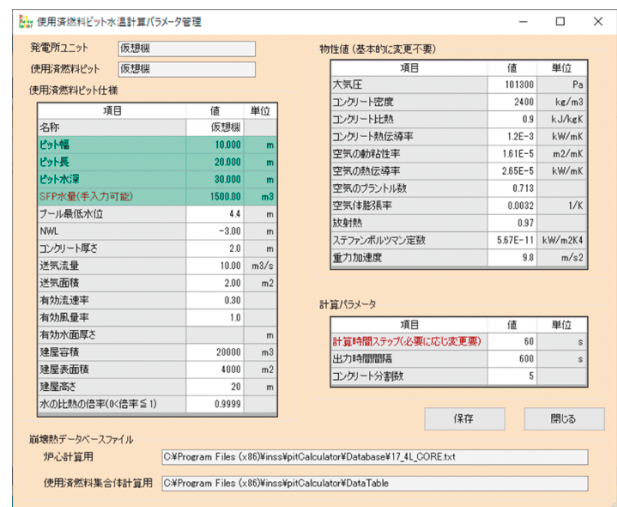


図2 「使用済燃料ピット水温計算パラメータ管理」画面

また、同時に複数のSFPが計算可能（マルチタスク方式）のようにプログラムを変更した。これまでは、SFP冷却ポンプ停止日時の違いによる感度解析は、一度計算を行った後で再度計算する時間的には直列の計算手法しかなかったものが、このマルチタスク機能の採用により、並列の計算も可能になり利便性が向上している。

### 2.2 SFP貯蔵データ関連

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3に示す画面が表示される。なお表示している内容は仮想の値である。この画面は、ピットに保管されている使用済燃料の仕様を外部データから読み込んだ結果を表示している。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、新たに外部データの読み込みが必要である。

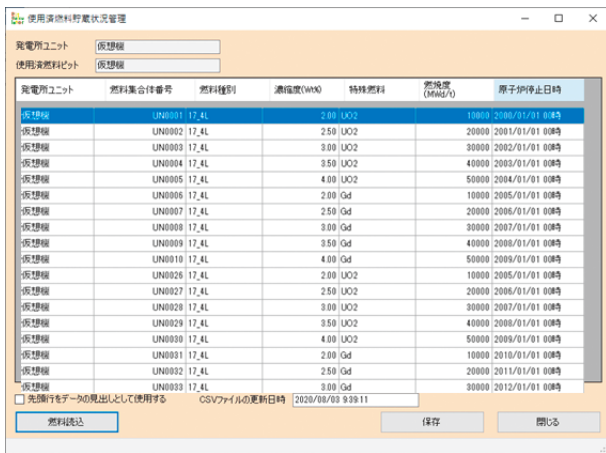


図3 「使用済燃料貯蔵状況管理」画面

### 2.3 崩壊熱データ関連

図4は初期画面から「使用済燃料ピット水温計算」をクリックすると表示される画面である。SFP冷却水ポンプの保守点検のための計画停止によりピット水温が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。この画面には、上述のSFP冷却ポンプ停止日時を入力する項目のほか、炉心からSFPへ移動予定の装荷燃料の1炉心分を一括で崩壊熱計算するために原子炉停止日時を入力する項目も設けている。

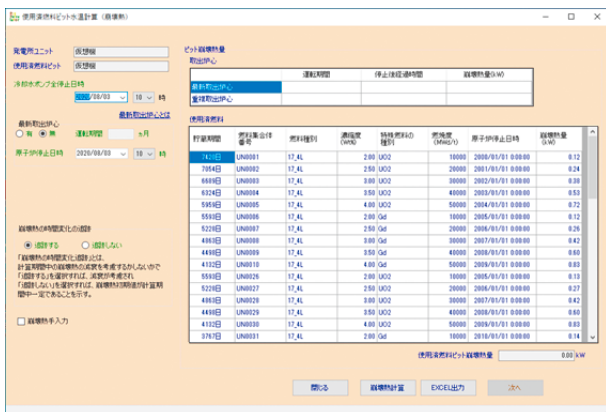


図4 「崩壊熱減衰等計算」画面

画面中にある「崩壊熱の時間変化の追跡」は、崩壊熱の時間減衰を考慮することにより、計算精度向上を狙ったものであるが、SFP保管燃料が1000体超ともなると、計算に時間を費やし実用的ではない場合が考えられる。そのため、評価時間が短時間である場合や、計算結果を急ぐ場合のために追跡しないことも選択出来るように改良を行っている。

崩壊熱の値そのものが、水温上昇・水位低下に最も影響することに鑑み、崩壊熱を手入力することも可能にし、多様な計算パスを設け、多様な現場ニーズに沿えるようにしている。

また、図4には、このツールで計算された崩壊熱値が表示されている。これは、燃料集合体の仕様毎に作成したデータテーブルを用いて、冷却期間と燃料集合体燃焼度 (MWd/t) から補間計算した結果を示している。

データテーブルは、ほぼ全てのタイプの燃料集合体 (Gd入り燃料やMOX燃料、回収ウラン燃料等) を網羅しており、現在、50種類のデータテーブルを保持している。

データテーブルに無いウラン濃縮度の場合でも、同種類の燃料集合体であれば、ウラン濃縮度でも補間計算できるように改良を実施している。このため、どのPWR事業者でも対応が可能である。

### 2.4 計算条件関連

図5は「使用済燃料ピット水温計算」画面のうちの後段部分で、図4で崩壊熱値が決定した後の画面であり、初期水温や計算終了条件等を指定する画面である。

- この画面では以下の3つの項目を追加した。
- ① 最低水位以下の水の存在を無視した計算パスの追加

これは、現場意見を反映したもので、燃料集合体上部より下部の水の存在を無視する計算を行



図5 「使用済燃料ピット水温計算」後段画面

うものである。この計算パスの追加により、水量が減じられ水温上昇が早くなり、比較対象として保守的な計算結果が得られる。なお、最低水位のデフォルト値は4.5mであるが、ユーザにより変更可能である。

#### ② 補給水の入力項目の追加

これも、現場意見を反映したものである。改良前は、補給水は設定水位になれば自動注水し、設定水位になれば補給水を自動停止する計算パスは設けていたが、実運用に鑑み、これをさらに手動による水の補給にも対応するようプログラムを改良したものである。流量値 ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) とそのタイミング（補給開始時刻と補給停止時刻）のほか当該補給水の水温 ( $^{\circ}\text{C}$ ) を入力する必要がある、100回まで入力が可能である。

#### ③ SFP冷却水ポンプ除熱分を除いた計算手法の追加

SFPポンプ運転状態での計算も出来るようとの現場意見を参考に導入した計算パスである。全崩壊熱量からSFP冷却水ポンプ除熱量（ユーザ入力による）を引き算した値 (kW) で水温・水位計算を行う。なお、画面入力では、除熱量のほか、起動と停止の日時を入力する仕様としている。

## 2.5 その他改良点

その他、上述以外に以下の改良を実施した。

#### ① Windows10での動作

これまではWindows7での動作であったが2020年1月のサポート終了に備え、Windows10上で動作するよう修正を行った。

#### ② マニュアルへの改良点反映と充実

改良の都度、マニュアルに反映すると同時に、熱容量差の計算過程を掲載するなど、技術伝承にも役立つよう内容の充実を図った。

#### ③ 画面上での解説の追加

ヘルプ機能やポップアップ機能を用いて、ユーザが画面上で確認できるよう、解説や補足説明を画面に可能な限り追記し、ユーザフレンドリーなツールを目指した。

## 3. 今後の改良

これまでの現場試用による意見反映等を踏まえ、継続的に改良を実施してきた。

崩壊熱データテーブルの拡充は引き続き実施する

とともに、現場意見の反映や、以下を視野に改良を続けていく予定である。

#### ① SFP改造対応

将来、耐震工事等でSFPの仕様変更になった場合に即対応出来るよう、改造工事設計段階から新ピットでの計算対応出来るよう準備を進める。

#### ② SFP冷却水ポンプ除熱

今回の改良では、SFP冷却水ポンプの起動停止は1回しか入力できないが、補給水が複数回入力出来るのと同様に、複数回入力できるよう改良を行う。

## 4. 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、水温と水位を予測するツール“Pit Calculator”を開発した。その後、現場での試用による意見反映を継続的に実施してきた。今後も現場意見を取り入れるなど更なる使い勝手向上を図るとともに、水温実測データ等の入手による計算精度向上に努めていく。

## 5. 謝辞

本改良にあたり、(株)サカイエルコム（本社：福井市）の協力があつた。この場を借りて謝意を表します。

## 文献

- (1) 柳 千裕, 村瀬 道雄ほか, “全交流電源喪失時の使用済燃料ピット水温と水位の予測”, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.11, No. 3, p.193-202 (2012).
- (2) 柳 千裕, 村瀬 道雄, “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”, INSS JOURNAL, Vol. 22, p.225-231 (2015).
- (3) 柳 千裕, 村瀬 道雄, “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 - の改良”, INSS JOURNAL, Vol. 26, p.274-279 (2019).