

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

Updated Pit Calculator

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

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。ここでは現時点で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 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 (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することを目的として、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、Pit Calculator に反映した⁽¹⁾。

2010 年度から 2011 年度にかけて開発した初期バージョン⁽²⁾の後、当初は簡易なマニュアルしか無かったため、2012 年度から本格的なマニュアル作成にも取り組みつつ、使い勝手向上の観点から実際に発電所所員に試用頂き、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。本解説では現時点での Pit Calculator の主要な改良内容について述べる。

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

2. Pit Calculatorの特徴

開発した当時のPit Calculator は以下の特徴を有していた。

- 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簡易計算。(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、計算結果をエクセル形式でも出力が可能。
- 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保有。
- ⑤ 崩壊熱は、核断面積データ JENDL-4.0⁽³⁾ を用いた燃焼計算ソフト ORIGEN2.2⁽⁴⁾ 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計算。
- ⑦ ピット保管の使用済燃料の体積と冷却時間の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 計算対象は、水温が100℃未満まで、水位は燃料上部まで。
- ⑨ BWRといった他の炉型の燃料についても、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。

なお、⑦に示す特徴は、今回の改良により入力項目が増加しているものの、後述する3.2 ①により、崩壊熱計算の精度向上が図られている。

3. Pit Calculatorの改良

3.1 入力パラメータ関連

初期画面中から「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1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(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表と、物

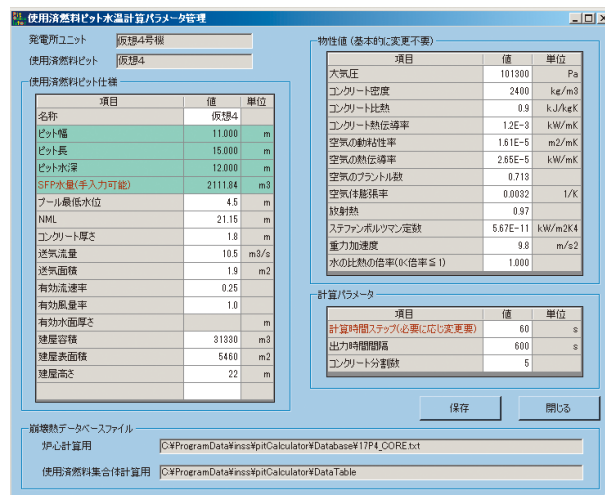


図1 「使用済燃料ピット水温計算パラメータ管理」画面

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。なお、ピットや建屋の仕様等は仮定の値である。

図2は初期画面中から「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、原子炉停止日時やSFP冷却ポンプ停止日時などを入力する項目も設けられている。

これら画面では、以下の改良を行っている。

① SFP水量値 (m³) 入力項目の追加 (図1)

これまでは、ピットの縦横長さ・深さから内部計算していた水量 (m³) を、手入力出来るように項目を追加した。現場では水量を把握している場合もあり、現場意見により反映したものである。

② 物性値近似式をテーブルデータに変更

Pit Calculatorでは、水の密度、飽和蒸気圧、空気比熱、蒸気粘性といった18種類の物性値を使用



図2 「使用済燃料ピット水温計算」画面

するが、それらは20-100℃の範囲内での近似式を内部計算で使用していた。しかし外気温度が20℃を下回る場合があることに対応するため、物性値テーブルの適用範囲を0-100℃に拡大するとともに、Pit Calculator内部で保持する近似式をテーブルデータに置き換え、補間計算するように改良を行った。

なお、誤入力防止の観点から温度項目に負値が入力されるとメッセージが表示され、計算が先に進まないようにツールを変更した。

③ 崩壊熱倍率の削除 (図1)

崩壊熱の値の不確かさを補償するために、崩壊熱の値を1.1倍する計算パスを設けていたが、後述のとおり、崩壊熱の値計算の精度向上を図ったことにより、当該計算パスを廃止した。

④ 崩壊熱手入力値項目の追加 (図2)

現場では崩壊熱の値は定期的に把握していることを踏まえ、崩壊熱の値を手入力する計算パスを新たに設けた。

これにより、従来SFPに保管中の燃料集合体データから計算された崩壊熱の値しか利用出来なかったものが、手入力により、迅速にSFP水温上昇・水位低下の計算のステップに移移することが可能になった。これは現場意見を踏まえ、改良したものである。

⑤ 原子炉停止日時とSFP冷却ポンプ停止日時の入力規則の変更 (図2)

原子炉停止日時は、冷却期間を算出するために必須の項目である。従来は過去の日時しか入力出来なかったが、これを撤廃し、未来の日時も入力出来るように改良を行った。

一方、SFP冷却ポンプ停止日時は未来の日時しか入力出来なかったが、過去の日時も入力出来るように改良を行った。これらの改良は現場意見を反映したものである。

⑥ 水の比熱に関する倍数項目の追加 (図1)

現状の仕様では、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っている。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ることとした

3.2 崩壊熱データ関連

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。この画面は、ピットに保管されている使用済燃料の体数を外部データから読み込んだ結果を表示しており、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、新たに外部データの読み込みが必要である。

発電所ユニット	燃料集合体番号	燃料種別	濃縮度(Wt%)	特殊燃料	燃焼度 (MWd/t)	原子炉停止日時
4号機	UN0001	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0002	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0003	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0004	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0005	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0006	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0007	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0008	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0009	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0010	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0011	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0012	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0013	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0014	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0015	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0016	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0017	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0018	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0019	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0020	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0021	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0022	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0023	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0024	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0025	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時
4号機	UN0026	17.4L	4.10	UO2	15215	2018/01/01 00時

図3 「使用済燃料貯蔵状況管理」画面

① 燃料集合体データテーブル作成対象の拡大

従来は、燃料棒配列(例:17×17)別に、14×14タイプの燃料集合体でウラン濃縮度2種類、15×15タイプの燃料集合体でウラン濃縮度1種類、17×17タイプの燃料集合体でウラン濃縮度2種類、の計5種類しかデータテーブルを保持していなかったが、これを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)を網羅する50種類のデータテーブルを保持することとし、現在40種類超のデータテーブルを保持している。

なお、従来保持していた5種類のデータテーブルは燃焼度が最高燃焼度程度まで照射されたという保守的な仮定で作成されているが、新たに作成したデータテーブルでは、集合体燃焼度での補間計算が出来るように改良を行った。

これは、崩壊熱計算の精度向上を目指したものである。

② ウラン濃縮度による補間計算の実施

従来は、上述の5種類のデータテーブルを用いて冷却期間だけで補間計算していたものを、冷却期間

以外に、①に記載のとおり集合体燃焼度のほか、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。

これも①と同じく崩壊熱計算の精度向上を目指したものである。

③ 外部燃料データの利用

開発段階では事業者から燃焼度データを入手することを想定していなかったが、現場での試用によりSFP保管燃料の燃焼度データを利用出来る運用も可能であることから、事業者が保持しているSFP保管燃料データ（燃焼度値含む）を流用できるように改良を実施した。

3.3 出力データ関連

図4は「使用済燃料ピット水温計算」画面のうちの後段部分で、初期水温や計算終了条件を指定する画面である。

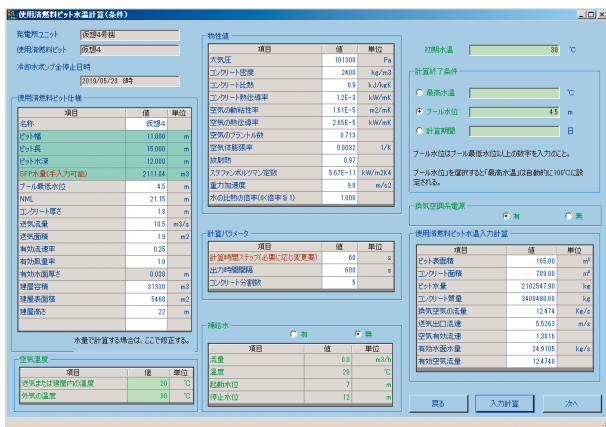


図4 「使用済燃料ピット水温計算」後段画面

計算結果の画面を図5に示す。図5(a)が表形式で出力される計算結果、図5(b)と図5(c)がグラフ形式での表示である。

① 表示項目選択 (図5(b)と(c))

計算結果をグラフ表示する場合、従来は体積平均水温以外に表面水温やコンクリート温度などを一括表示していたが、現場意見により、この表示項目をユーザが選択可能のように改良を行った。

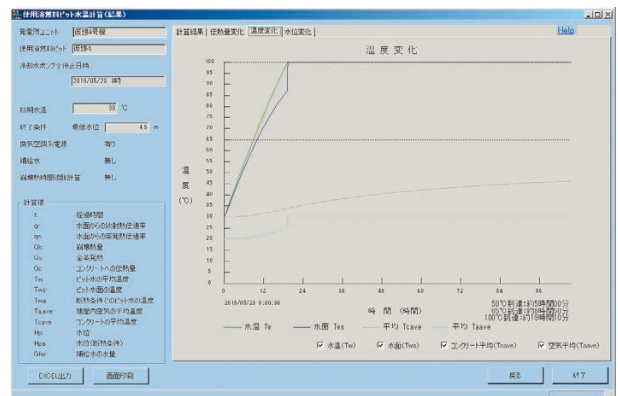
さらに表形式での表示の場合も、現場意見により背景色を変更する改良を行った。

② グラフ表示での機能追加 (図5(b)と(c))

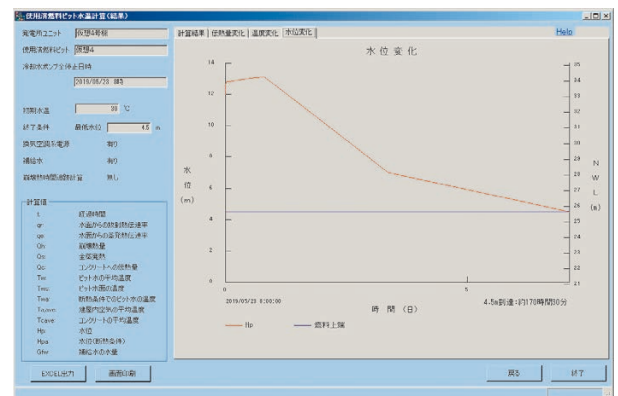
水温の時間変化グラフでは、現場意見により、100℃のほか、管理値である65℃の水平線を表示し



(a) 表形式の計算結果



(b) 温度変化のグラフ



(c) 水位変化のグラフ

図5 計算結果の画面

ているが、管理値を変更した場合でも対応出来るよう改良を行った。さらに、設定した水温や水位に到達するまでの時間をグラフに表示出来るようにも改良を行った。

3.4 その他改良点

その他、上述の分類以外に以下の改良を実施した。

① NWL (Normal Water Level) 表示の追加 (図5 (b)と(c))

これまではSFP底面を0mとして鉛直方向に水位を表示していたが、海水面を基準としたNWL (Normal Water Level) 表示を現場意見により追加した。

② マニュアルの充実

これまでは、数枚程度の簡易なマニュアルであったものを充実させると同時に、FAQ (よくある質問) と題し、換気空調系動作の水温に与える影響といった各種試算結果を掲載している。

③ 画面上での解説文の追加

現場意見に基づいて作成した解説1枚ものをツール起動時に表示させる機能を追加、ツール内で用いている単語や文章の解説や補足説明を画面に可能な限り追記、またヘルプ機能を追加するなど、ユーザーフレンドリーな作りを目指した。

4. 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、今後以下の現場意見などを視野に改良を続けていく予定である。

① 複数の評価日の一括計算

現在の仕様では、SFP冷却ポンプ停止日時は1つしか入力出来ないが、当該日時を複数設定可能 (例として3ヶ月間隔での日付) にし、1回の計算で複数のSFP冷却ポンプ停止日時を一括で計算出来るよう仕様を変更する。このことにより入力計算の省力化を図る。

② 複数ピットの同時計算

2つのピット (AピットとBピット) が水路でつながっているようなピットでは、それぞれ単独のピットでも、2つのピット長さを合算することにより1つのピットとして扱う計算も可能であるが、計算が3回 (Aピット単独、Bピット単独、AピットとBピットを1つのピットとして扱う計算) 必要である。その手間を省き、一度の入力で、当該3つの計算を一括で行うよう改良を行い、省力化を図る。

③ SFP冷却水ポンプによる除熱量を考慮

現在の仕様はSFP冷却ポンプ停止時の計算であるが、SFP冷却ポンプの除熱量をユーザ入力項目とし、SFPポンプ運転状態での計算も出来るよう改良を行う。

④ 最低水位以下の水量を除いた計算パスの追加

現在の仕様では最低水位 (デフォルト値は4.5m) 以下の水量を考慮した計算を行っているが、最低水位以下の水の存在を無視した計算が出来るようなパスを新設する。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。

⑤ SFP改造対応

将来、耐震工事等でSFPの仕様が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。

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、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。今後も更なる改良を続けるとともに、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。

6. 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, “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).
- (2) 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).
- (3) K. Shibata et al., “JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering,” J. Nucl. Sci. Technol. 48 (1) , 1-30 (2011).
- (4) S. B. Ludwig, A. G. Croff, Revision to ORIGEN2 - Version 2.2, Transmittal memo of CCC-0371/17, Oak Ridge National Laboratory (2002).