

## 論 説

## 平成25年改正規制基準に対する設置変更許可申請書での 近畿大学原子炉における外部火災影響評価

### The External Fire Effect Evaluation of UTR-KINKI in the Permit Application for the 2013-Regulation Standard's Update

芳原新也、左近敦士、橋本憲吾

Sin-ya Hohara, Atsushi Sakon, Kengo Hashimoto

## 抄録

福島第一原発事故に起因する原子炉施設に対する平成25年規制基準改定に対し、近畿大学は設置変更許可申請を行い、合格した後に設工認・使用前検査等を経て、平成29年4月に再稼働した。本稿では、審査ヒアリング等の規制当局とのコミュニケーションにおいて近畿大学が行った説明のうち、外部火災評価について法的根拠、各種算定値の算定方法、算定結果等について述べる。

## Abstract

The regulation standards for nuclear reactors were updated in 2013 to give a reaction for the accident of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Kindai university made a permit application document for the updated standards, and resumed the operation of UTR-KINKI at April 2017 via sanctions of facility update & the regulatory check of updated specs by the NRA (Nuclear Regulation Authority). Kindai university built a document set for those regulatory actions through the communication with the NRA. An evaluation document for the external fire effects is a part of the document set. Schematic view of the legal basis, methods and the results of the evaluation are shown in this paper.

Keyword: 2013- Regulation Standard's Update, External Fire Effect, Evaluation, Permit Application, UTR-KINKI, WTF-KINDAI

## 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震を起点とした3.11大震災は、東京電力所有（当時）の福島第一原子力発電所において各機器に大きな損傷を与え、これにより、福島第一原発事故が発生した。この事故は、東北地方から関東地方にかかる広範囲において環境放射性汚染を発生させ、地域住民は避難を余儀なくされ、その日常生活に大きなイン

パクトを与えた。

この事故により、当時与党であった民主党政権は、原子力規制を組織構成から変更することを決定し、経済産業省の原子力安全・保安院と文部科学省の原子力規制室を、各省から分離・統合し、環境省の外局として原子力規制庁を構築した。原子力規制庁は、3条委員会である原子力規制委員会の事務局として機能し、平成25年には原子炉施設に対する許

可に係る施設性能要求を更新・強化した。この許可基準は規則として制定されたが、それまでの性能基準運用と異なり、原子力規制委員会は運用中原子炉施設に対して、過去の許可による継続運用を認めないこととした。いわゆる「バックフィット（遡及）規制」が原子炉の設置変更許可に導入されたのである。

バックフィット規制により、運転中の原子炉は一斉に設置変更許可申請作業及び設工認等の後段規制対応を迫られた。近畿大学原子炉では、平成25年規制基準対応を平成26年から平成29年第一四半期にかけて実施した。本稿では、当該作業のうち設置変更許可申請に係る外部衝撃対応作業（試験炉許可基準規則第6条対応）における外部火災影響評価について述べていく。

## 2. 外部火災影響評価の流れ

### 2-1 外部火災影響評価の法源

原子炉施設に対する規制は、原子力基本法の下位に設定される「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（昭和32年6月10日法律第166号）（以下「原子炉等規制法」という）に基づき実施される。原子炉等規制法は、これまでも何度か改正されており、現在のところ最終改正は平成29年4月14日法律第15号の「原子力利用における安全対策の強化のための核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律等の一部を改正する法律」に基づく改正である。

原子炉等規制法内では、近畿大学原子炉の区分となる試験研究用等原子炉に関する具体的な規制は第4章第1節（第23条～第43条の3の4）に定められており、原子炉施設そのものの性能基準については、第24条第1項第3号において原子力規制委員会規則に委任することが定められている。

原子炉等規制法第24条第1項第3号に定める規則は、「試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（原子力規制委員会

規則第21号）（以下「試験炉許可基準規則」という）であり、ここで様々な試験研究用等原子炉施設の性能に対する許可基準が定められている。近畿大学原子炉は、出力が非常に低い原子炉に相当するため、試験炉許可基準規則内での適用対象となる条文は総則及び第2章の第1条～第30条である。

各性能基準のうち近畿大学原子炉に対する火災影響評価の法源となる条文は、試験炉構造基準規則のうち「外部からの衝撃による損傷の防止」を定めた第6条となる。近畿大学原子炉は第6条第2項の対象である重要安全施設を有しない設計であるため、第1項及び第6項が適合対象条文となる。

上記の試験炉許可基準規則第6条の記載のみでは、火災影響評価の必要性を読み取ることは出来ないが、原子力規制委員会は当該規則に対して「試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備基準に関する規則の解釈」（平成25年11月27日 原規研発第1311271号）（以下「試験炉許可基準規則解釈」という）を制定しており、この中の第6条解釈第2項において「森林火災」、第6条解釈第8項において「近隣工場等の火災」に対する設計確認を行う様に規定している。

### 2-2 試験研究炉における外部火災影響評価

前述の通り、試験研究用等原子炉に対する火災影響評価は、試験炉許可基準規則第6条に基づいて原子力規制庁から実施要求されるが、具体的な評価方法等については原則事業者責任で論理構築を行う様に要求される。試験研究用等原子炉に対する外部火災影響評価をどの様に審査すべきかという審査ガイドラインが存在しないため、現状において原子力規制庁の担当部門は、実用発電用原子炉のために作成された「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」（平成25年6月制定）（以下「外部火災影響評価ガイド」という）を便宜的に適用しており、同ガイドと異なる場合には、同等レベルの説明性を持つエビデンスを提出するよう求めている。また、同ガイドの

一部項目の未実施に対しても、未実施で問題が無い旨の論理及びエビデンスを、同ガイドと同等以上の説明性を持って作成するよう事業者に対して求める。

このため、実質全ての試験研究用等原子炉は、実用発電用原子炉と同じ外部火災影響評価を実施しなければならない状況となっている。

### 2-3 評価対象となる外部火災源

試験研究用等原子炉に対する外部火災影響評価は、大きく2つの作業区分に分けることができる。最初の作業区分は「火災源からの輻射条件の決定」であり、続く作業区分は「輻射による施設構造物の健全性確認」である。これらの作業方針は、前述の外部火災影響評価ガイドに記載されているが、全ての作業手順が網羅されているわけではない。具体的な火災源候補についても前述の試験炉許可基準規則解釈に「森林火災」と「近隣工場等の火災」が規定されているが、外部火災影響評価ガイドの「4.外部火災の影響評価」において「航空機墜落による火災」が項目として追加されている。このため、原子炉施設においては、少なくとも「森林火災」、「近隣工場等の火災」、「航空機墜落による火災」の3項目は必須となる。

なお近畿大学原子炉の場合は、その立地の特殊性から以上の3項目に加えて「近隣住宅の火災」、「近隣のガソリンスタンドの火災」、「隣接する可燃物保管庫の火災」、「近隣の空港における火災」による影響も評価する様に、設置変更許可申請ヒアリングの中で別途指示され、実施した。

## 2-4 輻射強度の算定

### 2-4-1 森林火災

森林火災に伴う評価対象施設への輻射強度見積もりに係る作業手順については、前述の外部影響評価ガイドの「附属書A 森林火災の原子力発電所への影響評価について」（以下「附属書A」という）に記

載されている。詳細については、同附属書を読んで頂くのが良いが、その概要を掻い摘んで説明する。

森林火災による対象施設への輻射強度は時間進展を伴った影響評価をする様に求められている。附属書Aの中では、米国農林省（U. S. Department of Agriculture）の森林局（U. S. Forest Service）において開発されたFARSITEコード（<https://www.firelab.org/project/farsite>）を用いて当該輻射強度評価を行うことが推奨されている。FARSITEやユーザーマニュアルはインターネット経由で入手可能で、その入手及び使用には特段の制限は掛けられていない。

しかしながら、FARSITEを使用するには入力ファイルとして、地形及び傾斜に関する情報ファイル、森林部における樹木の種類や植生密度等に関する情報ファイル、対象地域における風向・風速などに関する情報等を準備する必要があり、これらの情報ファイルについては事業者の責任で整備することが求められる。附属書Aにおいては、これらの情報について評価対象施設を起点として東西南北にそれぞれ12kmの範囲（24km×24kmの領域）で、整備する様に定めており、情報ファイルの中で最も細かいものについては10mメッシュで整備する様に求めている。

近畿大学原子炉に関しては、最も近隣の森林部（東部の生駒山麓部）から約6kmと離れているため、生駒山火災時においても火災延焼はないとの説明により十分と判断された。

### 2-4-2 近隣住宅の火災

前述の通り、近畿大学原子炉においては森林火災による輻射影響評価を行わなくて良かったが、一般木造住宅街が隣接しているため、近隣住宅の火災による影響評価を行う様に求められた。木造住宅の火災による輻射強度の算定については、外部影響評価ガイド及びその附属書には記載が無かったため、事業者責任において整備する必要があった。木造住宅

の火災時における輻射強度の経時変化については、消防研究所（現 消防庁消防大学校消防研究センター）において過去に観測され報告されていたので、そのデータを使用することとした。以下に、木造住宅火災時における輻射強度変化について述べる。

### 2-4-2-1 消防研究所による木造住宅火災時の輻射強度観測結果

消防研究所による木造住宅の火災実験は過去に数度行われており、その目的は大地震時の住宅火災影響を見積もるための基礎データ収集である。それらの実験のうち、火災源からの輻射強度測定を行っている報告としては、1973年の特別研究報告書「大震災火災の延焼性状に関する研究野外火災実験 概要報告」と1998年の研究報告書「市街地火災時の空中消火による延焼阻止効果に関する研究報告書」が相当する。

1973年の報告書の主実験は、密集地域における延焼性状の観測であったが、派生実験のうち第4測定班の行った測定（第2部「実測概要」のpp21-29）で仮想住宅火災時の輻射強度の経時変化が測定されている。測定結果として綺麗に経時変化が出ているものとして第20図(a)があり、これをベースとして木造住宅火災時の輻射強度の経時変化式を導出することとした。

上記の測定結果は単一家屋火災時の輻射強度に相当するが、複数家屋の同時火災時におけるデータについては、1998年の報告書において報告されている。1998年の報告書は、同時多発火災時における空中消火の延焼阻止効果の観測を主目的としていたが、多数家屋同時火災時の輻射強度2次元分布（最盛期）が同報告書内の図4.1-3（pp47）に示されており、これを基に木造住宅火災源からの離隔距離と輻射強度との関係式を導出することとした。

### 2-4-2-2 木造住宅火災時の輻射強度算定式

木造住宅の同時多発火災時に放射される輻射熱の強度の時間変化は、前述の通り、消防研究所技術資料第5号に観測結果が示されている。図1に観測結果を示す。

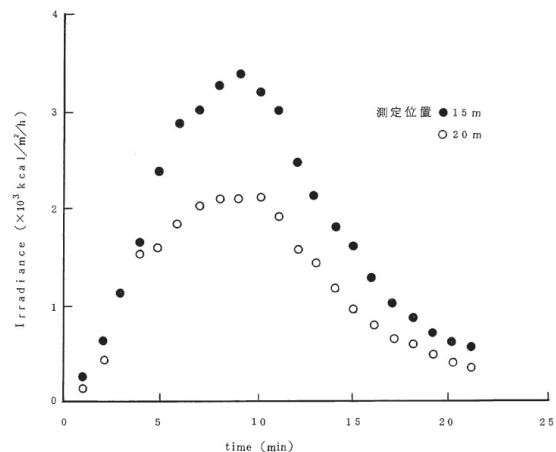


図1 同時多発火災時の一定の離隔距離地点における輻射強度の時間変化

ここで、輻射強度の時間変化は、火災発生8～10分後までに急速に増加し、最大輻射時刻を境に緩やかに減少する傾向を持っている。この木造住宅の同時多発火災時における輻射強度の時間変化は、以下の式により近似することが出来る。

$$E = C_1 \cdot C_s \cdot t^2 \cdot \exp\left(-\frac{t^{C_2}}{C_3}\right) \dots\dots(1)$$

$$C_s = \left\{ \frac{C_2}{2 \cdot C_3} \cdot e \right\}^{\frac{2}{C_2}} \text{は規格化定数}$$

図1の輻射強度の時間変化のうち、変化傾向がより明確である離隔距離15m地点における輻射強度を(1)式により近似した結果を図2に示す。この時、図2に示す近似式の $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ はそれぞれ $C_1=3264.2$ 、 $C_2=1.53$ 、 $C_3=19.96$ となる。

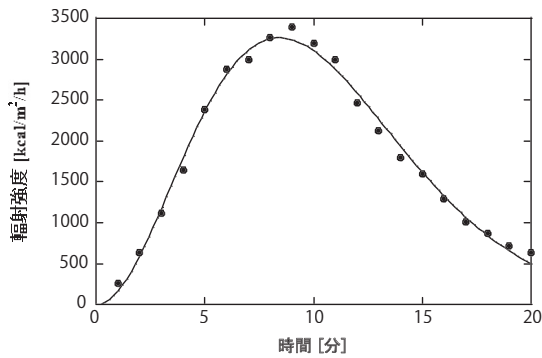


図2 木造住宅の同時多発火災時における輻射強度の時間変化

また、複数家屋の同時多発火災発生時における輻射強度の最大値と離隔距離との関係については、前述の通り、消防研究所研究資料第42号に観測結果が示されている。図3に複数家屋の同時火災発生時における輻射強度の最大値の分布図を示す。

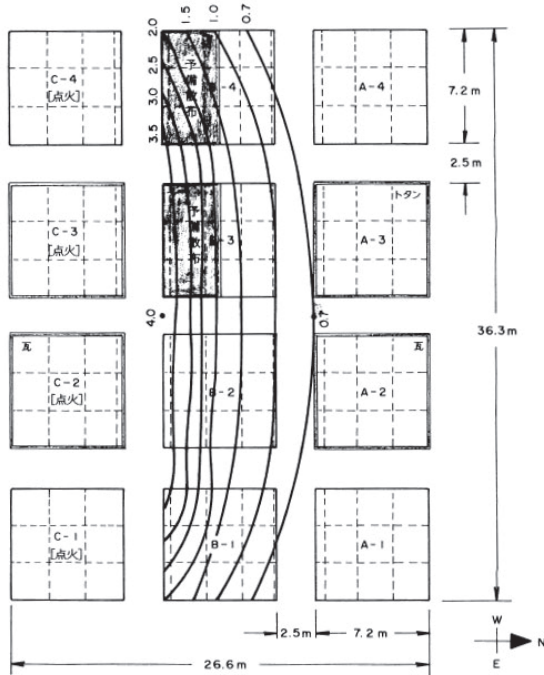


図3 複数家屋の同時多発火災発生時における輻射強度の最大値の分布図

図3に示す通り、同時多発火災においては、輻射強度は火災面に対して垂直な強度勾配を持つ傾向にあることがわかる。ここで、同時多発火災時における火災面から任意の離隔距離における輻射強度が、火災面上の任意の点からの輻射の火災面上での面積

分であるとする、火災面からの離隔距離と輻射強度の関係は以下の式で近似することができる。

$$E_{max} = C_1 \cdot \pi \cdot \left( 1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 + C_2^2}} \right) \dots\dots(2)$$

図3のA-2 ~ A-3、B-2 ~ B-3、C-2 ~ C-3間の中央直線上（南北方向）における最大輻射強度と火災面からの離隔距離との関係および近似曲線を図4に示す。図4の近似曲線のC<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>はそれぞれC<sub>1</sub>=2.03、C<sub>2</sub>=6.48となる。

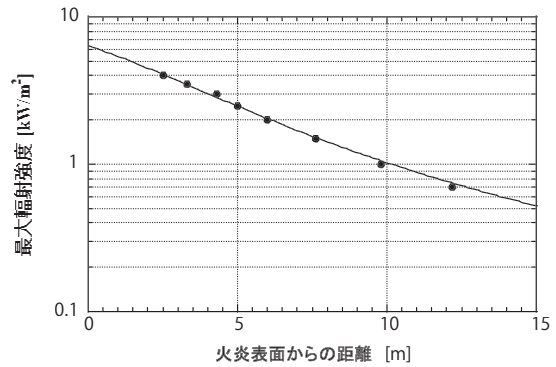


図4 複数家屋の同時火災発生時における火災軸中心からの距離と輻射強度の最大値との関係

以上より、木造住宅の火災時における任意の距離における輻射強度は以下の式で算定できる。

$$E(x, t) = 2.03 \cdot \pi \cdot \left( 1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 + 6.48^2}} \right) \times C_s \cdot t^2 \cdot \exp\left(-\frac{t^{1.53}}{19.96}\right) \dots\dots(3)$$

C<sub>s</sub> = 0.052

### 2-4-2-3 近畿大学原子炉施設への輻射強度算定

近畿大学原子炉の周辺は、木造住宅街が広がる立地となっている。南側については約50m位置に道路を挟んで一般住宅地が隣接、東側については本学運動場を挟んで約80m以上離れて一般住宅地が隣接、北側及び西側については本学の鉄筋コンクリート校舎が隣接する形となっているため、一般住宅地の火災については、南側住宅地の火災評価に包絡されるとした。

南側一般住宅火災時における本原子炉建屋への輻射強度は、(3)式で求めることができる。ここで、火

災住宅と本原子炉建屋の距離は50 mであることから、放射強度の時間変化は図5の通りとなった。

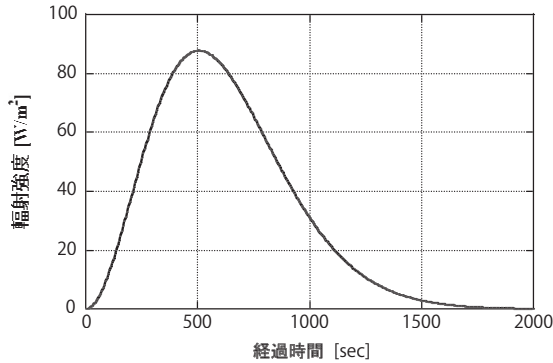


図5 南側一般住宅地の火災時における本原子炉施設建屋への放射強度の時間変化

### 2-4-3 近隣工場等の火災

近隣工場等火災の影響評価は、二段階に分かれており、第一段階として評価対象となる石油コンビナート群からの離隔距離が確保されているか否かを評価する。十分に距離が確保されている場合は、第一段階評価で終了となるが、離隔距離が不十分である場合には、第二段階として、火災に伴う放射影響評価を求められる。

近隣工場等の火災に伴う評価対象施設への放射強度見積りに係る作業手順については、消防庁特殊災害室が発行している「石油コンビナートの防災アセスメント指針」をベースとして、前述の外部影響評価ガイドの「附属書B 石油コンビナート等火災・爆発の原子力発電所への影響評価について」（以下「附属書B」という）にまとめられ記載されている。詳細については、同附属書を読んで頂くのが良いが、その概要については森林火災と同様に掻い摘んで説明する。

近隣工場等の火災に伴う放射強度の算定は、基本的に円柱状に燃え立つ火柱を仮定して算出する。放射強度自体は、燃焼の原因物質により一意に決まる放射発散度と、火炎柱の底面積及び火炎柱中心からの距離によって決定される形態係数により算出される。火災に伴う放射の影響評価には、放射強度の他

に放射の継続時間が必要となるが、前述の「石油コンビナートの防災アセスメント指針」に当該記載がないことから外部火災影響評価ガイド内にも関係記載がなく、事業者責任において放射継続時間の論理構築および算定をする必要がある。

近畿大学原子炉においては、評価対象となる石油コンビナート（大阪南港の石油コンビナート）からの離隔距離が10km以上あるため、第一段階評価のみで終了となった。

### 2-4-4 近隣のガソリンスタンドの火災

近畿大学原子炉の石油コンビナートの火災に対する影響評価は、前述の通り、離隔距離評価のみにとどまったが、街中という立地のためガソリンスタンドの火災に対する影響評価を行う様に求められた。しかしながら、外部火災影響評価の設置変更許可ヒアリングを受けていた2015年10月当時において営業していたガソリンスタンドの事業所数は、東大阪市だけでも128事業所あり、これに隣接市の大阪市、八尾市の営業所を加えると、実に743事業所もあったため、全事業所の調査検討に人的・時間的資源を割くことは難しい状況であった。このため、近畿大学原子炉から1km範囲内のガソリンスタンドについて火災時影響評価を行うこととした。

ガソリンスタンドは「消防法」（昭和23年法律第186号）第10条に定める危険物（この場合は消防法別表第一に定める第四類危険物）の貯蔵所に相当する。危険物貯蔵所の構造等については、「危険物の規制に関する政令」（昭和34年政令第306号）（以下「危険物規制令」という）において防油堤を設けることが義務付けられているため、火災原因物質の燃焼面積については、この防油堤に囲まれた面積（ほとんどのガソリンスタンドの場合、営業を行っているコンクリ床面積と同じ面積）を採用することにした。また放射継続時間については、各ガソリンスタンドの危険物の許可数量及び前述の燃焼速度を用いて算定出来る燃焼継続時間を採用することにした。

2-4-4-1 近畿大学原子炉から1km以内のガソリンスタンド

近畿大学原子炉から1km範囲内のガソリンスタンドに関する調査は、3つの工程に分けて実施した。第1工程として1km範囲内のガソリンスタンド事業所数の調査、第2工程として各事業所の取扱危険物の種類と数量の調査、第3工程として各事業所の敷地面積の調査を実施した。第1工程調査は、インターネット上の無料地図サービスであるGoogle Map及びこれを利用した距離算定サービスを利用して実施した。第2工程調査は、第1工程調査で挙げられた全事業所に行き、事業主あるいは現場責任者に事情を説明し、各事業所の許可危険物の種類及び数量を参照させてもらう旨の許可を貰って調査を行った。なお、許可危険物の種類及び数量については、危険物規制令によって掲示することが義務付けられているため、掲示情報を参照させてもらった。第3工程調査は、Google Mapの衛星写真及び前述のGoogle Mapを利用した距離測定サービスから敷地面積の概算を行った。

以上の調査結果（2015年10月当時）を表1に示す。近畿大学原子炉から1km以内に設置されているガソリンスタンドは、南東方向約270m位置に1事業所、南南東方向約560m位置に1事業所、南東方向約990m位置に2事業所、東方向約830mに1事業所、北北西方向約730mに1事業所、北西方向約990mに1事業所の計7事業所であった。

表1 近畿大学原子炉施設周辺のガソリンスタンド

事業所	取扱数量[m <sup>3</sup> ]		面積 [m <sup>2</sup> ]	本原子炉施設からの距離 [m]
A	第1石油類	30,000	336	270
	第2石油類	20,000		
B	第1石油類	26,000	264	560
	第2石油類	14,000		
	第3石油類	550		
C	第1石油類	50,000	594	730
	第2石油類	30,000		
	第3石油類	2,000		
	第4石油類	2,000		

D	第1石油類	30,000	630	830
	第2石油類	20,000		
	第3石油類	1,800		
	第4石油類	1,000		
E	第1石油類	39,200	644	990
	第2石油類	29,400		
	第3石油類	2,000		
F	第1石油類	44,000	2112	990
	第2石油類	108,000		
G	第1石油類	16	225	990
	第2石油類	14		

2015年10月当時 近畿大学原子力研究所調査

2-4-4-2 ガソリンスタンドの火災による輻射強度

前述の通り、各事業所の火災時における近畿大学原子炉施設への輻射強度は、表1の調査結果より算出した。輻射強度は、附属書Bに記載の以下の式により算定する。

$$E = Rf \cdot \phi \quad \dots\dots(4)$$

E: 輻射強度 [W/m<sup>2</sup>]、Rf: 輻射発散度 [W/m<sup>2</sup>]、φ: 形態係数

輻射発散度については、附属書Bのデータ集に記載の輻射発散度を参考に設定することとし、第1石油類についてはガソリン・ナフサの数値を適用、第2石油類については灯油の数値を適用、第3石油類については重油の数値を適用、第4石油類についてはn-ヘキサンの数値を適用し算定する。形態係数については、調査結果及び附属書Bに記載の以下の式により算出する。

$$\phi = \frac{1}{\pi \cdot n} \cdot \tan^{-1} \left( \frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{n} \cdot \left[ \frac{(A - 2 \cdot n)}{n \cdot \sqrt{A \cdot B}} \cdot \tan^{-1} \left[ \frac{A \cdot (n - 1)}{\sqrt{B \cdot (n + 1)}} \right] - \frac{1}{n} \cdot \tan^{-1} \left[ \frac{(n - 1)}{(n + 1)} \right] \right] \quad \dots\dots(5)$$

$$m = \frac{H}{R} \approx 3, \quad n = \frac{L}{R}, \quad A = (1 + n)^2 + m^2, \\ B = (1 - n)^2 + m^2$$

φ: 形態係数、L: 離隔距離 [m]、H: 炎の高さ [m]、R: 燃焼半径 [m]

また火炎柱の燃焼半径については、以下の式により算出することとした。

$$R = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \times \sqrt{w \times d} \quad \dots\dots(3)$$

R：燃焼半径 [m]、w：防油堤幅 [m]、d：防油堤奥行き [m]

以上の手順に従い算出した放射強度を、次節に示す手順で求めた放射継続時間とともに表2に示す。表2に示す通り1 km以内のガソリンスタンドのうち、最も放射強度の大きくなるガソリンスタンドは、本原子炉施設から約270 m離れているものである。これより、表2のBからGのガソリンスタンドの評価については、Aのガソリンスタンドの評価に包絡されることがわかる。このため、ガソリンスタンドの火災影響評価についてはA事業所の評価のみを実施することとした。

なお、本稿執筆時の2017年10月現在においては、A事業所は廃業しておりガソリンスタンドとは異なる店舗に変わっている。

表2 本原子炉施設から1km以内のガソリンスタンドによる放射強度と放射時間

事業所	登録油種	放射強度 [W/m <sup>2</sup> ]	放射時間 [sec]
A	第1石油類	165.9	1.12×10 <sup>6</sup>
	第2石油類	143.0	0.76×10 <sup>6</sup>
	合計	308.9	
B	第1石油類	30.0	1.23×10 <sup>5</sup>
	第2石油類	25.9	6.80×10 <sup>3</sup>
	第3石油類	11.9	7.44×10 <sup>4</sup>
	合計	67.9	
C	第1石油類	39.8	1.05×10 <sup>6</sup>
	第2石油類	34.3	6.48×10 <sup>5</sup>
	第3石油類	15.8	1.20×10 <sup>5</sup>
	第4石油類	58.3	2.81×10 <sup>4</sup>
	合計	148.2	
D	第1石油類	32.7	5.95×10 <sup>5</sup>
	第2石油類	28.2	4.07×10 <sup>5</sup>
	第3石油類	12.9	1.02×10 <sup>5</sup>
	第4石油類	47.9	1.32×10 <sup>4</sup>
	合計	121.7	
E	第1石油類	23.4	7.61×10 <sup>5</sup>
	第2石油類	20.2	5.85×10 <sup>5</sup>
	第3石油類	9.3	1.11×10 <sup>5</sup>
	合計	52.9	

F	第1石油類	77.1	2.60×10 <sup>5</sup>
	第2石油類	66.5	6.56×10 <sup>5</sup>
	合計	143.6	
G	第1石油類	8.1	8.89×10 <sup>2</sup>
	第2石油類	7.0	7.98×10 <sup>2</sup>
	合計	15.1	

### 2-4-4-3 ガソリンスタンドの火災による放射の継続時間

前述の通り、各事業所における火災の継続時間については、各ガソリンスタンドの登録量、ガソリンスタンドの敷地面積及び「石油コンビナートの防災アセスメント指針」137ページ表3に記載の燃焼速度から以下の式に従い算出した。

$$t = \frac{V}{\pi \cdot R^2 \cdot v} \quad \dots\dots(4)$$

R：燃焼半径 [m]、V：貯蔵量 [m<sup>3</sup>]、v：燃焼速度 [m/s]

算出した火災継続時間、つまり放射時間を表2に示す。

### 2-4-5 隣接する危険物保管庫の火災

前項のガソリンスタンドと同様に、大学キャンパス内という立地条件ゆえに構内に存在する危険物保管庫についてもガソリンスタンドと同様に火災時の影響評価を行う様に、設置変更許可申請ヒアリングの中で求められた。原子炉施設の設置してある近畿大学東大阪キャンパスには、2015年10月当時においては危険物保管庫が2箇所を設置されており、そのうちの1箇所が原子炉施設から50mという非常に近い位置にあった。これらの保管庫の貯蔵量を表3、表4に示すが、種類・数量及び離隔距離のいずれにおいても危険物保管庫1が危険物保管庫2を包絡する状態となっている。このため、危険物保管庫1についてのみの評価を行うこととした。

表3 近畿大学東大阪キャンパスにおける危険物の保管数量  
(危険物保管庫1：本原子炉建屋から50m)

分類	種類	数量
第1類	第1種 酸性性固体	1 kg
	第2種 酸性性固体	1 kg
	第3種 酸性性固体	1 kg



第2類	第1種 可燃性固体	1 kg
	第2種 可燃性固体	1 kg
	硫黄	2 kg
第3類	第1種	0.5 kg
	第2種	1 kg
	第3種	1 kg
	カリウム	1 kg
	ナトリウム	1 kg
第4類	特殊引火物	170 リットル
	第1石油類	700 リットル (非水溶性)
		400 リットル (水溶性)
	アルコール	500 リットル
	第2石油類	200 リットル (非水溶性)
		100 リットル (水溶性)
	第3石油類	50 リットル (非水溶性)
100 リットル (水溶性)		
第4石油類	50 リットル	
動植物油類	50 リットル	
第5類	第1種	1 kg
	第2種	1 kg
第6類		20 kg

表4 近畿大学東大阪キャンパスにおける危険物の保管数量  
(危険物保管庫2：本原子炉建屋から250m)

分類	種類	数量
第4類	特殊引火物	1 リットル
	第1石油類	25 リットル (非水溶性)
		40 リットル (水溶性)
	アルコール	40 リットル
	第2石油類	5 リットル (非水溶性)
		5 リットル (水溶性)
	第3石油類	5 リットル (非水溶性)
150 リットル (水溶性)		

貯蔵危険物のうち、附属書Bで近隣工場火災での燃焼評価対象となっている物質は第4類危険物のみとなる。第4類危険物の放射発散度については、ガソリンスタンド評価時と同様に、附属書Bデータ集に記載の放射発散度を参考に設定することとし、特殊引火物についてはプロピレンの数値を適用、非水溶性第1石油類についてはガソリン・ナフサの数値を適用、水溶性第1石油類についてはベンゼンの数値を適用、アルコール類についてはエタノールの数値を適用、非水溶性第2石油類については灯油の数値を適用、水溶性第2石油類についてはベンゼンの数値を適用、非水溶性第3石油類については重油の

数値を適用、水溶性第3石油類についてはベンゼンの数値を適用、第4石油類についてはn-ヘキサンの数値を適用、動植物油類については評価対象としないこととした。

危険物保管庫1における第4類危険物は、コンクリートブロック造り約10m×4mの建屋のうち約5m×4mの区画に保管されるため、燃焼面積は20m<sup>2</sup>として算定する。保管場所は、近畿大学原子炉施設まで最短距離で約50m隔離しているため、形態係数は隔離距離50mで算出した。また、放射継続時間についてもガソリンスタンド評価と同様の手法により算出した。各危険物の燃焼による本原子炉建屋への放射強度及び放射時間を表5に示す。なお、本稿執筆時点である2017年10月時点においては、隣接校舎の建て替えに伴い当該危険物保管庫は撤去されている。

表5 貯蔵危険物による本原子炉建屋への放射強度と放射時間

種類	放射強度 [W/m <sup>2</sup> ]	放射時間 [sec]
特殊引火物	3.64×10 <sup>2</sup>	6.54×10 <sup>1</sup>
第1石油類 (非水溶性)	2.89×10 <sup>2</sup>	4.38×10 <sup>2</sup>
第1石油類 (水溶性)	3.09×10 <sup>2</sup>	2.00×10 <sup>2</sup>
アルコール	5.98×10 <sup>1</sup>	7.58×10 <sup>2</sup>
第2石油類 (非水溶性)	2.49×10 <sup>2</sup>	1.82×10 <sup>2</sup>
第2石油類 (水溶性)	3.09×10 <sup>2</sup>	5.00×10 <sup>1</sup>
第3石油類 (非水溶性)	1.15×10 <sup>2</sup>	8.93×10 <sup>1</sup>
第3石油類 (水溶性)	3.09×10 <sup>2</sup>	5.00×10 <sup>1</sup>
第4石油類	4.24×10 <sup>2</sup>	2.08×10 <sup>1</sup>
最大値	4.24×10 <sup>2</sup>	7.58×10 <sup>2</sup>
合計値	2.42×10 <sup>3</sup>	1.85×10 <sup>3</sup>

## 2-4-6 航空機墜落による火災

航空機墜落による火災の影響評価手順については、外部火災影響評価ガイドの「附属書C 原子力発電所の敷地内への航空機墜落による火災の影響評価について」(以下「附属書C」という)に規定されている。詳細については、附属書Cを読んでもらうのが良いが、以下で概要について説明する。

航空機墜落に伴う火災影響評価手順の殆どの部分については、前述の近隣工場火災影響評価と同様である。しかしながら、それらの評価と異なる点が原

子炉施設からの離隔距離の設定と、火炎柱の燃焼面積の設定である。航空機を、防油堤を有しない移動貯蔵所と見なした場合の当然の帰結ではあるのだが、離隔距離については附属書C内において「航空機の墜落は発電所敷地内であって墜落確率が $10^{-7}$  (回/炉・年) 以上になる範囲のうち原子炉施設への影響が最も厳しくなる地点で起こることを想定する。」と定めている。また、燃焼半径についても同附属書C内において「燃焼半径は燃料タンクの投影面積を円筒の底面と仮定し算出する。」と定められている。

これにより、離隔距離については総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会原子炉安全小委員会が定めた「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率に対する評価基準」(以下「航空機落下確率評価基準」という。)を基にして算出、燃焼面積は選定した航空機的设计図を基に算出すれば良いことになる。ただし、評価対象の航空機については、事業者責任による選定となる。

近畿大学原子炉の場合、計器飛行方式民間航空機としてボーイング社製のB747-400を、有視界飛行方式民間航空機としてドルニエ社製のDo282-200を、自衛隊・米軍機としてマクダネル・ダグラス社製(現ボーイング社)のF15-Jを選定した。各航空機の近畿大学原子炉施設からの離隔距離及び最大燃料積載量を表6に示すが、いずれの項目においてもB747-400が他の航空機墜落火災を包絡することがわかる。

表6 各航空機の離隔距離及び最大燃料積載量

航空機	離隔距離 [m]	最大燃料積載量 [kL]
B747-400	88.32	216.84
Do282-200	163.52	2.39
F15-J	100.92	7.64

しかしながら、B747-400についてはボーイング社が詳細設計図を社外秘情報としているため、燃料タンクの投影面積を求めることが出来ないという問

題があった。このため、燃料タンク投影面積の算出においては、保守的に主翼、主翼が交差する胴体下部及び尾翼の面積として700 [m<sup>2</sup>] を算出した。なお、B747-400の主翼面積については当該航空機を運用しているドイツのルフトハンザ航空が後継機のB747-8との比較表の中で525 [m<sup>2</sup>] と2012年に公表している。

以上より、航空機墜落による火災における放射強度及び放射継続時間は表7の通りに算出された。

表7 航空機墜落による火災における放射強度及び放射時間

放射強度 [W/m <sup>2</sup> ]	$2.60 \times 10^3$
放射時間 [sec]	$3.97 \times 10^3$

## 2-5 壁面温度の算定

前項で放射条件の設定は出来たが、原子炉施設への外部火災影響評価は、本項で説明する壁面温度推移の算定を経ることで可能となる。これは、外部火災影響評価ガイドの中で「放射強度(想定火災の放射熱に対する原子炉施設の熱影響評価)」という記載により、放射熱による建屋躯体の温度上昇が、その構造材強度等の機能劣化に至らないことを確認する様に求めているからである。

ここで問題となるのが、建屋壁面の温度推移をどのような手法で行うのかという点と、建屋壁材が「機能劣化」に移行すると判断する判定基準温度をどうするのかという点である。これらの手法及び判定基準については、外部影響評価ガイド内での具体的な記載はなく、全て事業者責任で行うことが求められていた。近畿大学原子炉では、壁面温度算定手法として、当時電気事業者が採用していた一次元半無限固体に対する解析解を用いる手法ではなく、一次元差分陽解法による数値計算法を採用した。

電気事業者が2015年当時に採用していた方法に使用されていた解析解は、東京大学出版会から発行された「伝熱工学」(庄司正弘著)の第4章「非定常熱伝導」の「4.1.4 半無限物体の熱伝導」で導出された式であった。しかしながら同節の最初には、以

下の様な記載で適用限界があることが明記されていた。

半無限物体は現実には存在しないが、地中などは半無限とみなせる。また、ごく短時間の熱伝導を問題にする場合は、温度の伝わる領域は薄く、物体の大きさが有限であつても半無限物体として扱える。

しかしながら、前節で決定した輻射時間と壁面厚さを考慮すると、とても上記の適用限界内に収まっているとは思えない状況である。このため、近畿大学原子力研究所において一次元陽解法による温度計算コードを開発し、壁面温度の推移を評価することとした。近畿大学で開発したコードについては、次節で説明する。

また、壁材が機能劣化に至るか否かの判定基準については、他事業所に倣い、財団法人日本建築センターが発行した「建築火災のメカニズムと火災安全設計」(原田和典著)の「第2編 火災安全設計」における「第11章 構造体化設計」内の「11-4 鉄筋コンクリート構造の火災時耐力」の以下の記載を根拠として200℃を採用した。

圧縮強度は、200℃程度までは常温と殆ど変わらないかむしろ上昇する。

前述の計算コードにより、火災輻射による原子炉施設の壁面温度推移を評価したが、当該コードについては、ローレンス放射線研究所(現ローレンス・バークレー国立研究所)で開発された差分法に基づく温度分布計算汎用コード「TRUMP」との相互比較検証を行っており、1%以下の精度で一致することも確認した。なお、モックアップモデルに対するTRUMPコードでの検証計算は木村化工機株式会社(東証一部、銘柄コード:6378)に依頼して実施した。

### 3. 壁面温度の時間推移評価に用いた計算コード

前述した通り、近畿大学原子力研究所は外部火災影響評価を行うために壁面温度に関する計算コード(以下「WTF-KINDAI」という)を開発した。WTF-KINDAIは、開発期間の短縮を重視して、Microsoft社製の開発環境であるVisual Studio 2012を用いてVisual C#で開発した。動作環境は、.NET Framework対応環境下であれば実行できるが、推奨環境はWindows 8.1 Home以上である。WTF-KINDAIのユーザーインターフェースは、運用容易性を重視してGUI(Graphical User Interface)を採用しており、誰でも容易に使用できる形としている。WTF-KINDAIのユーザーインターフェースを図6に示す。



図6 WTF-KINDAIのユーザーインターフェース画面

以下に、WTF-KINDAIの基礎理論及びコード概要を示す。

#### 3-1 一次元平板における熱伝導方程式による差分法

壁面への輻射が壁面において一様であると仮定すると、壁の深さ方向に対する非定常一次元熱伝導での壁内温度の時間変化を解析することとなる。なお本解析においては、放射伝熱による壁の冷却はないものと仮定する。

内部での熱の発生がない場合の一次元熱伝導方程式は以下のとおりとなる。この時、壁面において深さの負方向末端から熱の投入があり、正方向末端から熱の放出があるとすると、

$$\rho_{wall} \cdot c_p \cdot \frac{\partial T(t, x)}{\partial t} = \lambda_{wall} \cdot \frac{\partial T(t, x)}{\partial x} \quad \dots\dots(5)$$

$$\begin{aligned} x=0 \text{ において} \quad q_{wall}(t, 0) &= q_{in} \\ x=M(\text{end point}) \text{ において} \quad q_{wall}(t, M) &= q_{out} \end{aligned} \quad \dots\dots(6)$$

ここで、(5)の左辺、右辺を差分記述で書き換えると、以下のとおりとなる。

$$\frac{\partial T(t, x)}{\partial t} = \frac{T[t+1, x] - T[t, x]}{\Delta t} \quad \dots\dots(7)$$

$$\frac{\partial T(t, x)}{\partial x} = \frac{T[t, x+1] - 2 \cdot T[t, x] + T[t, x-1]}{\Delta x^2} \quad \dots\dots(8)$$

(5)、(7)、(8)より、任意の離散点における温度は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} T[t+1, x] &= s[x] \cdot T[t, x+1] + (1-2 \cdot s[x]) \cdot \\ &T[t, x] + s[x] \cdot T[t, x-1] \end{aligned} \quad \dots\dots(9)$$

ただし、

$$s[x] = \frac{\lambda_{wall}}{\rho_{wall} \cdot c_p \cdot \Delta x^2} \cdot \Delta t \quad \dots\dots(10)$$

この時、深さ方向の離散化点をゼロオフセットとし、最大離散化数をMとした場合、壁末端における温度は、境界条件(6)より、以下のとおりとなる。

$$T[t, 0] = T[t, 1] + \frac{\Delta x}{\lambda_{wall}} \cdot q_{in}[t] \quad \dots\dots(11)$$

$$T[t, M-1] = T[t, M-2] - \frac{\Delta x}{\lambda_{wall}} \cdot q_{out}[t] \quad \dots\dots(12)$$

ただし、差分陽解法による解析を行うにあたり、計算結果を発散させないために式(10)のs[x]が0.5以下となる様に離散化距離Δxと離散化時間幅Δtを設定する必要がある。

### 3-2 平板表面における自然対流による熱除去

周囲の空気と温度差のある壁面においては、壁面

と空気との間で熱流束が発生する。この時、壁面近辺の空気は受け取った熱量により膨張あるいは収縮し、周囲の空気との密度差を生じ自然対流を発生させる。この自然対流により発生する熱流束は、壁面からの単純な熱伝導ではなく流体との熱伝達により解析される。

周囲の空気の温度が一定であると仮定した場合、壁面から空気への熱流束は、熱伝達率hを用いて以下のとおりとなる。

$$q_{cool}(t) = h(t) \cdot (T_{wall}(t) - T_{air}) \quad \dots\dots(13)$$

一方、対流による熱伝達と流体の熱伝導の比率は、以下に示すヌセルト数Nu（無次元数）により表される。

$$Nu(t) = \frac{h(t) \cdot L}{\lambda_{air}} \quad \dots\dots(14)$$

L：代表的な長さ [m]、λ<sub>air</sub>：空気の熱伝導率 [W/m/K]

加熱された垂直壁面における自然対流時のヌセルト数は、流れ場における粘性力に対する浮力の影響を示すグラスホフ数Grと流体の動粘性度と温度拡散率の比であるプラントル数Prの関数として、以下に示す式により表される。

$$Nu(t) = b \cdot (Gr(t) \cdot Pr)^m \quad \dots\dots(15)$$

ただし、

Gr·Pr < 10<sup>9</sup> において b=0.59, m=1/4 (層流)

Gr·Pr > 10<sup>9</sup> において b=0.129, m=1/3 (乱流)

グラスホフ数Grは、その定義より以下のとおりとなる。

$$Gr(t) = \frac{L^3 \cdot g \cdot \beta \cdot (T_{wall}(t) - T_{air})}{\nu^2} \quad \dots\dots(16)$$

g：重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]

β：単位温度差に対する空気の体積膨張率

ν：空気の動粘性度 [m<sup>2</sup>/s]

この時、輻射を受ける壁面を黒体表面と仮定すると、壁面へ入射する熱流束q<sub>in</sub>は、壁面への輻射強度q<sub>rad</sub>と空気の自然対流による壁から空気への熱流束q<sub>cool</sub>により、以下のとおりとなる。

$$q_{in}(t) = q_{rad}(t) - q_{cool}(t) \quad \dots\dots(17)$$

### 3-3 WTF-KINDAIの実装コード概要

WTF-KINDAIは基本的に2重ループによる繰り返し計算構造によって構築されている。外側の計算ループは時間発展を行うループ、つまり $\Delta t$ の進展を行うループで、内側の計算ループは温度の空間伝播を行うループ、つまり $\Delta x$ 間の熱流束を追うループとなっている。外側ループの前段処理として、書き込みファイルの設定や初期条件設定等を行っており、内側ループの前段処理として、壁面表面における冷却処理計算や計算処理のファイルへの書き出し等を行っている。計算コードの概略処理フローチャートを図7に示す。計算結果は、プレーンテキストで出力する形式としており、様々な表計算ソフトでの処理が可能となっている。

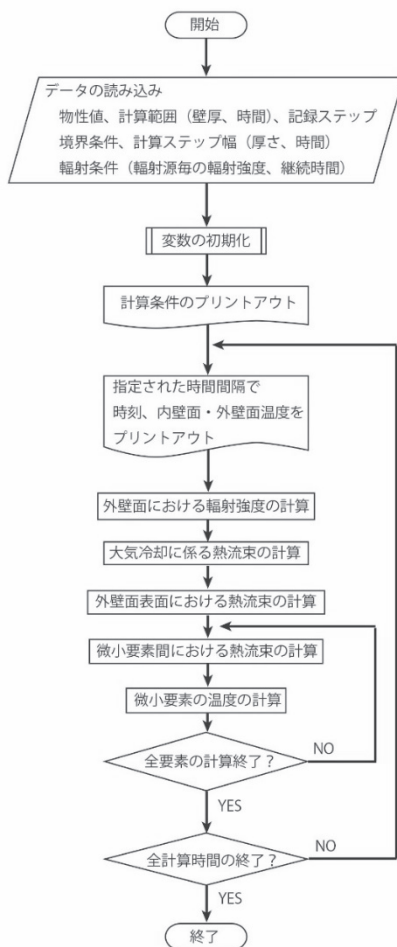


図7 計算コードの概略処理フローチャート

### 4. 近畿大学原子炉の外部火災影響評価結果

上記の手法により、外部火災時の原子炉施設壁面の温度推移計算結果を図8～11に示す。図8は近隣住宅火災時における壁面温度推移、図9は近隣のガソリンスタンド火災時における壁面温度推移、図10は大学構内の危険物保管庫の火災時における壁面温度推移、図11は航空機墜落に伴う火災時における壁面温度推移である。詳細な計算条件については、原子力規制庁において公開されているヒアリング説明資料を参照してもらうのが良いが、いずれの場合においても、原子炉施設の外壁面及び内壁面温度は200℃を下回るため、近畿大学原子炉施設は外部火災に対して健全性を維持するとの評価結果となった。

当然のことながら、直接輻射及び冷却を受ける外壁面に比べて、壁材を通じて熱伝達を受ける内壁面が時間遅れを持って温度変化していることが全ての場合において見て取ることが出来る。

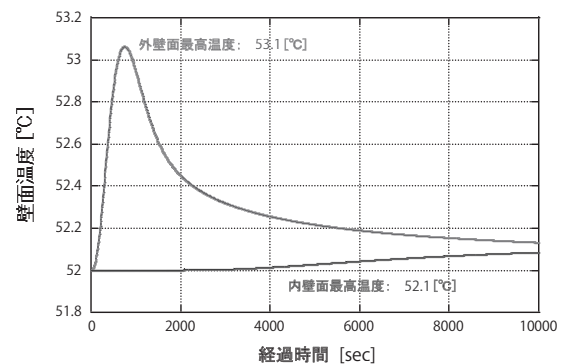


図8 南側一般住宅地の火災時における本原子炉建屋の壁面温度変化

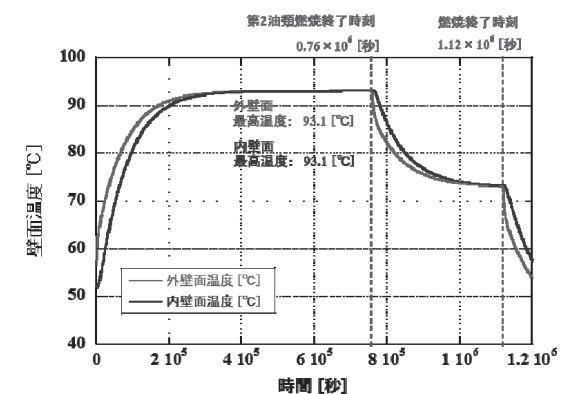


図9 ガソリンスタンドの火災時における本原子炉建屋の壁面温度の時間変化

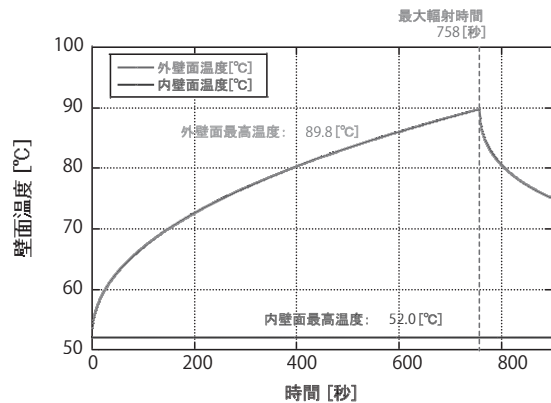


図10-a 危険物保管庫1の火災時における本原子炉建屋の壁面温度の時間変化  
(合計の輻射強度で最大の輻射時間だけ輻射が継続した場合)

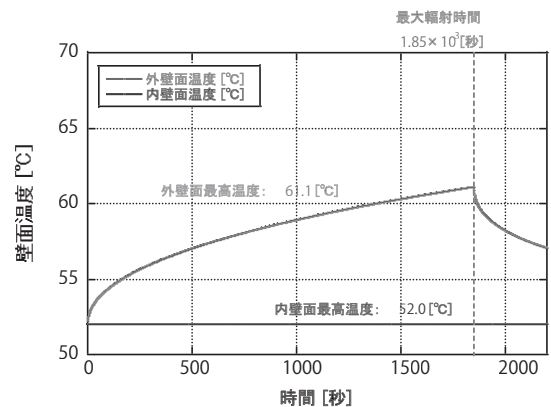


図10-b 危険物保管庫1の火災時における本原子炉建屋の壁面温度の時間変化  
(最大の輻射強度で合計の輻射時間だけ輻射が継続した場合)

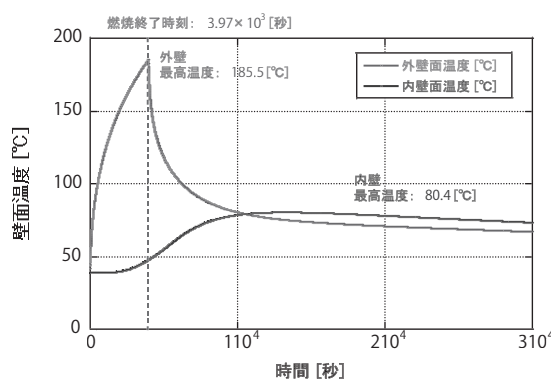


図11 航空機墜落に伴う火災時における本原子炉建屋の壁面温度の時間変化

## 5. 最後に

本稿では、設置変更許可申請に係る外部衝撃対応作業（試験炉許可基準規則第6条対応）のうち、外

部火災影響評価について概説した。外部火災影響評価ガイドの適用範囲は以下の通りに明確に定められており、試験研究用等原子炉施設は明らかに適用範囲外である。

### 1.2 適用範囲

本評価ガイドは、実用発電用原子炉及びその附属施設に適用する。

そうであるにも関わらず、近畿大学原子炉の審査において同ガイドを準用したことは、内在リスクに対して過剰要求であったのではないかと考えられる。この背景を考えると、試験研究用等原子炉施設に対する審査ガイドの未整備という事実があるが、これは試験研究用等原子炉施設に対する審査ガイド群を整備しないと原子力規制委員会の判断及び人的資源の未配備が原因にある。

今回の規制基準改定については、試験炉許可基準規則の定義条記載内容に係る二重解釈問題に始まり、二転三転する耐震重要度分類に係る判断基準、各審査ガイドの未整備、明確な規定文書の存在しない評価項目追加、「事業者責任に基づく機能性審査」の名目で事業者に丸投げされた各種のクライテリアやロジック構築、実用炉設計工事品管規則のデッドコピーにしか見えない試験炉設工認品管規則等々といった、所作の乱暴さが目立った改定であったと感じられた。

実際に審査ヒアリング等に出席すると、現場の審査官の真摯さ・真面目さとは対照的に、規制の根本方針自身が非常に貧弱であったとの印象を受けざるを得なかった。これは特に、審査マニュアルが未整備な状況において保守的な審査書を作成しようと奮闘している現場と、これを真っ向から否定する原子力規制委員の発言とのギャップからも感じられた。

今回は富に「グレーデッドアプローチ（階級的取扱い）」の文言を聞いたが、本来であれば内在リスクに対応した各グレード階級に個別の規制マニユア

ルを整備することこそが、キチンとした階級的取扱いを実現するために最低限必要なことであっただろうと思われる。今回の原子力規制委員会の言動を見ても、「内在リスクが少ないからマニュアル整備は手抜きしても良いだろう。大は小を兼ねるのだ」との思惑が透けて見えると言っても過言ではない。

限られた人的資源・時間的資源の中ではしょうの無いことであつたかも知れないとは理解できるのだが、そういった言動に対する本質的な総括がなされていない現状においては、対応した事業者側からは「しょうがなかったですね」とは言いにくい状況であると言わざるを得ない。平成29年4月14日公布の法令改正に対する対応においては、「内在リスクが少ないから手抜きでいいよ」といった思いを持たずに対応してくれることを願うばかりである。