

2013 年原子力学会秋の大会 企画セッション

『シグマ』特別専門委員会活動報告と核データの新規ニーズ開拓」

(3) 新規ニーズ開拓 1) 廃止措置分野

日本原子力発電 (株)

廃止措置プロジェクト推進室

田中 健一

kenichi-tanaka@japc.co.jp

1. はじめに

日本原子力学会「2013 年秋の大会」の総合講演・報告 1 で、廃止措置と核データの接点及び廃止措置を実施している事業者として核データ利用上の課題や要望などについて講演をさせていただく機会をいただいた。原子力発電所の廃止措置に従事する“核データのエンドユーザ”がどのように核データを利用し、核データに対してどのようなことを望んでいるか、さらに広く知っていただき、廃止措置分野における核データ利用への関与をより活発なものにしていきたいと考えている。

2. 廃止措置と核データ

2.1 廃止措置という事業

今般「廃炉」という言葉が新聞、雑誌そしてテレビ番組で大変多く見られ、聞かれるようになってきた。「廃炉 (廃止措置)」とは、「原子炉を永久停止し、核燃料を原子炉から取り出して施設外に搬出し、施設内に残存する放射性物質の除去 (除染) を行い、施設を解体し、解体撤去物を適切に処理処分する。」ことである。廃止措置として行うことは、言葉にしてしまえばこの通りなのであるが、これを行うためには数百億円の費用と数十年の期間が必要であり、一大事業なのである。また、廃止措置という事業は、その結果として何かを生み出すものではなく、廃止措置に要した費用は回収されることのないという特異な事業なのである (廃止措置終了後の跡地を再利用する、解体撤去物を再利用するなどがあるが、費用回収という観点では本質でない)。このような事業の特徴を勘案すれば、安全かつ合理的であることに加え、より経済的な廃止措置の実施は、事業者 (原子力施設の廃止措置を実施する事業者) にとって重大な責務であるといえる。

2.2 廃止措置の準備作業（放射能インベントリ評価について）

事業者は廃止措置を行おうとする場合、廃止措置対象施設の状況把握、工事計画立案、廃棄物量評価、安全評価（周辺公衆の被ばく評価、作業従事者の被ばく評価）及び廃止措置費用算定など準備のための作業を廃止措置工事に先立って実施する。このような廃止措置に向けた準備の作業を「廃止措置の準備作業（準備作業）」と呼んでいる。準備作業で最初に着手するのが廃止措置対象施設の状況把握である。廃止措置対象施設内に残留する放射性物質の量と分布を評価する作業を放射能インベントリ評価（施設の運転中に生成し、停止後も施設に残存する放射能に対する評価）といい、廃止措置対象施設の状況把握作業のひとつとして実施している。放射能インベントリ評価は廃止措置準備作業の最も初期の段階で実施し、その結果は以降実施される業務、例えば、廃止措置工事計画の立案、廃棄物の処理処分計画立案や廃止措置時の安全評価などで用いられる。廃止措置工事や放射性廃棄物処理処分の安全評価では、周辺公衆や放射線業務従事者の被ばく線量評価のソースタームとして用いられる。また、廃止措置で発生する放射性廃棄物の物量評価にも用いられるなど、廃止措置工事及び放射性廃棄物の処理処分を安全かつ合理的に実施するために必須の情報となっている。精度が良く、信頼性のある放射能インベントリは、下流側で実施される計画立案業務の合理性や信頼性を向上させるものであり、ひいては廃止措置全体の品質を高め、経済的に有利な廃止措置の実施を可能にするものである。

2.3 放射能インベントリ評価における核データの利用

核データは、放射能インベントリ評価で実施される中性子束分布計算及び放射性核種の生成・崩壊計算において、断面積ライブラリとして使用される。放射能インベントリ評価の信頼性は、評価手法と使用するデータによって確保される。評価に用いる計算コードと断面積ライブラリは、廃止措置対象施設に依らない一般的なものを使用している。放射能インベントリ評価を実施する事業者にとっては、計算コード及び断面積ライブラリの信頼性に加え、その信頼性に関する説明性の良さが重要である。

3. 廃止措置における放射能インベントリ評価

3.1 放射能インベントリ評価の手順

放射能インベントリは、施設における放射性物質による汚染の性状から次の 2 種類に大きく分類できる。ひとつは、中性子照射によって施設構造物の材料を構成する元素から生成する放射化生成物（放射化汚染）によるものである（図 1 参照）。放射化汚染の計算（放射化放射能評価）は、施設構造物材料の照射中性子束を算出する中性子束分布計算と核分裂生成物及び／又は放射化生成物を計算する放射化計算に分けられる。

もうひとつは、核燃料物質の核分裂によって生じた核分裂生成物及び／又は放射化生

成物が施設内に拡散し、施設構造物の表面に付着した2次的な汚染（以下、「2次的汚染」という）によるものである（図2参照）。2次的汚染評価では、核分裂生成物や放射化生成物の施設内における拡散のメカニズムを評価に取り込む必要があるものの、核分裂生成物や放射化生成物の生成量の計算手順は放射化汚染と同じである。

放射能インベントリ評価の信頼性は、中性子束分布計算と放射化計算それぞれにおいて用いられる計算モデルとデータの妥当性によって説明され、そして、計算結果と実測された値との比較によって検証される。計算結果と実測された値との比較は、両者の比（計算結果を実測された値で割ったもの；C/M (Calculated Value/Measured Value)）を用い、

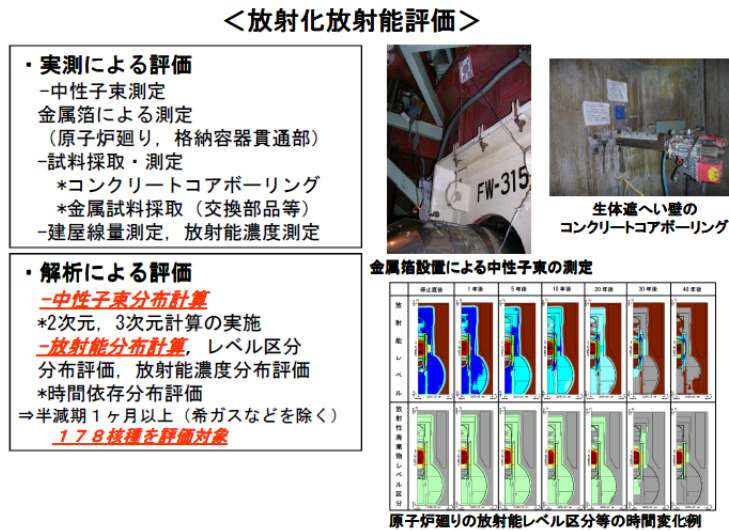


図1 放射化放射能評価について

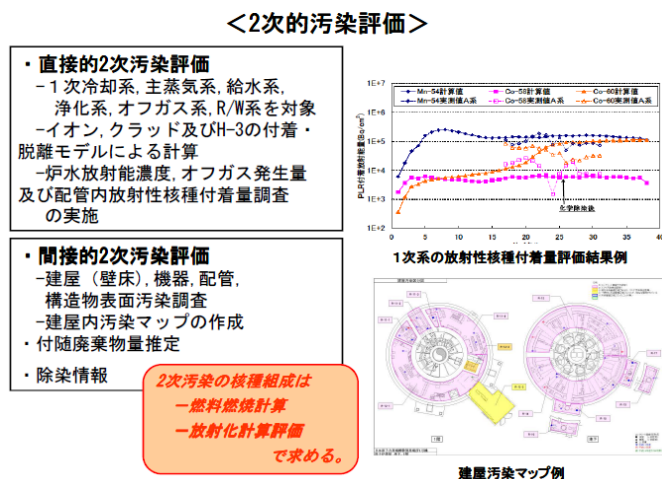


図2 2次的汚染評価について

C/M が 1 以上 10 以下である場合、計算に信頼性があると判断している¹⁾。

また、放射能インベントリ評価では、線量告示などに示される放射性核種のうち、半減期が 1 ヶ月以上の 227 核種を対象として、さらにそこから希ガス、酸素及びフッ素等を除いた 178 核種を評価対象核種として取り扱うこととしている。

3.2 放射能インベントリ評価の品質保証活動

放射能インベントリ評価に求められる「品質」には、法令が原子力事業者に要求する品質保証活動と評価結果の精度及び信頼性の 2 つの事項がある。

(1) 法令に基づく品質保証活動

法令に基づく品質保証活動とは、原子力発電事業者業務が法令の定めるところに従い JIS9001 (ISO9000) に則った品質保証を行うことである。事業者が行う品質保証活動は、原子力発電所の保安活動と位置づけられる。放射能インベントリ評価もこの品質保証に従って実施している。このため、評価実施に関するマニュアルを定め、記録を確実にしている。放射能インベントリ評価が適切に実施され、評価結果が妥当であることは、「検証エビデンス」によって示さなければならない。評価で用いる物理量は原則として公開文献などを用いるが、その文献などは権威のある機関によってレビューされたものであること、その数値を用いることによって「安全側評価」が可能であることなどを示す必要がある。また、使用する計算コードは十分な使用実績があり、評価への適用の妥当性を示す必要がある。核データの利用、ここでは使用する断面積ライブラリについても同様のことが求められる。

(2) 評価結果の精度及び信頼性

評価結果の精度及び信頼性とは、評価結果がどれほど現実を忠実にシミュレートしているか、そして、その結果はどれくらい信頼できるものであるかということである。そして、事業者はこれらを検証し、説明する必要がある。計算の精度は、評価モデルの詳細さ（現実をどこまで計算モデルに再現するか）及び使用するデータの正確さに依存する。計算モデルについては、廃止措置対象施設の現実の構造を建設図面又は製作図面などを参照し構築する。この際、計算コードの入力形式や取り扱える幾何形状（空間次元数、座標系（直交系、円筒系、球体型））の制限を受ける。また、幾何形状の忠実な再現だけではなく、計算モデルが評価対象の物理現象を如何によく再現しているかが重要である。

使用する計算コードについては、実績重視で選択を行っている。一般に公開されている計算コードのベンチマーク結果は、コード選択において重視している要素のひとつである。ただし、計算の精度と計算資源は、事業者にとってトレードオフの関係にあり、適切な精度を妥当な計算資源（特に計算時間）で得られることが望ましい。また、計算結果については、近年応用数理の分野で着目されてきている「精度保証付き数値計算」²⁾

を考慮していく必要があると考えている。

計算に使用する主なデータには、構造材を構成する元素の組成及び断面積がある。元素組成は、実機から材料採取し分析したものを用いている。元素組成の分析結果には測定誤差が与えられている。断面積は、汎用の断面積ライブラリを使用することが一般的である。断面積ライブラリの選択では、実績より参照した核データが最新であることを重視している。断面積ライブラリには、通常マニュアルが整備され、使用方法の他、断面積作成の方法やベンチマーク計算結果などが与えられており、放射能インベントリ評価で用いる断面積としての妥当性を検討できるようになっており、これらを参照し、評価の特性に適した断面積ライブラリを選択している。

評価結果の妥当性確認は、前述した通り C/M が 1 以上 10 以下であることを条件としているが、この条件は他分野における計算精度に比べると緩い条件となっているのではないかと考えている。放射能インベントリ評価においても、V&V (Verification and Validation ; 検証と妥当性確認) の考え方を取り入れて、精度向上と信頼性向上を図っていく必要があると考えている。

3.3 放射能インベントリ評価の実績

国内における廃止措置における放射能インベントリ評価の実績としては、旧日本原子力研究所の動力試験炉 (JPDR)³⁾ があり、実用発電用原子炉では日本原子力発電(株)東海発電所⁴⁾ 及び旧動燃の新型転換炉原型炉施設 (ふげん)⁵⁾ がある。これらの評価における放射化生成物の計算で用いられた計算コードと断面積ライブラリは表 1 の通りである。また、表 1 の下半部には原電での新しいコードや断面積を用いた最新の計算実施状況を纏めた。表 1 から、放射化生成物の計算では使用する計算コードはほぼ同じであるが、使用している断面積が異なっていることがわかる。評価ごとに使用される断面積ライブラリが異なっているのは、評価対象の特性の違いによるものの他、評価を実施した年代による。

放射能インベントリ評価では遮へい計算や燃料の燃焼計算のために開発、整備された計算コードや断面積ライブラリが使用されている。廃止措置の準備作業で実施する放射能インベントリ評価は、国内外で実績が多くないこと、また、これまではニーズが多くなかったことから、廃止措置における放射能インベントリ評価に特化した計算コードや断面積ライブラリは整備されていない。昨今の社会環境を勘案すると廃止措置の拡大が予想される。このような状況の下で、放射能インベントリ評価の精度及び信頼性の向上並びに評価結果の説明性向上、すなわち、評価結果の品質ためには、次に示すようなこの分野の特性を考慮した断面積ライブラリの整備が必要であると考えている。

- 広い評価対象範囲を対象とした中性子エネルギースペクトルの多様な変化に対応すること。

- 評価対象となる構造物は鉄又はコンクリートが主であることから中程度の重量の核種を中心とした放射性核種の生成・崩壊を取り扱うこと。
- 数 10 年に及ぶ長い中性子の照射期間及び照射後（運転終了後）の数 10 年から数万年までの長い評価対象期間を取り扱うこと。
- 数多くの（現在は 178 核種が対象）の評価対象とする放射性核種を扱うこと。

表 1 放射能インベントリ評価で用いられた計算コードと断面積ライブラリ

評価対象	計算分類	計算コード, 断面積ライブラリ	説明
JPDR ³⁾	中性子束分布計算	ENDF/B-IV AMPX-II PROF-GROUCH-GII ANISN, DOT3.5	AMPX-II によって ENDF/B-IV から 208 群の無限希釈断面積を作成している。材料温度は 300K, 560K, 900K 及び 1200K の 4 種類を設定している。この断面積を PROF-GROUCH-GII よって自己遮蔽効果を考慮した上で 48 群に縮約し実効断面積を作成し、ANISN によって 7 群に縮約し、DOT3.5 で 2 次元中性子束分布を計算している
	放射化計算	ORIGEN-MD DCHAIN-MD	ORIGEN-MD, DCHAIN-MD はそれぞれ ORIGEN-79 及び DCHAIN を基にして、中性子束分布を直接読み込む機能を追加したものである。DCHAIN-MD は 7 群の中性子束を用いて計算している。
東海発電所 ⁴⁾	中性子束分布計算	VITAMIN-C AMPX-II ANISN, DOT3.5, TORT	AMPX-II によって VITAMIN-C から 171 群の実効断面積を作成している。材料温度は 793K, 550K, 300K の 3 種類を設定している。ANISN によって 21 群に縮約し、DOT3.5 で 2 次元中性子束分布を計算。配管の貫通部で TORT を使用している。
	放射化計算	NJOY ORIGEN-GCR	ORIGEN2 の放射化断面積ライブラリをガス炉用に置き換えたものである。1 群放射化断面積は、NJOY コードで JENDL-2, JENDL-3 及び BNL-325 を参照し 137 群の実効断面積を作成し、ANISN によって 1 群に縮約している。
ふげん ⁵⁾	中性子束分布計算	JSSTD MACROJ ANISN, DOT3.5	JSSTD (100 群) を MACROJ コードで処理してマクロ断面積を作成している。ANISN で 100 群から 13 群、21 群及び 25 群の 3 種類の縮約断面積を作成している。2 次元計算結果は実測した値との比較では 25 群が最も良い一致を示していた。
	放射化計算	ORIGEN79 (ORIGEN2)	ORIGEN79 で計算を行う他、NJOY コードにより JENDL-3.2 及び ENDF/B-VI を用いて 199 群の放射化断面積を作成し、これを原子炉廻りの 199 群スペクトルで 1 群に縮約している。ORIGEN-79 による計算結果とここで新たに作成した 1 群断面積 (ORIGEN2 を使用) では計算結果の比較では両者に大きな差はなかった。
東海発電所 原子炉廻り 燃料交換機	中性子束分布計算	FSXLIB-J33 FSXLIB-J40 MCNP5	原子炉廻りの計算は FSXLIB-J33 を、燃料交換機廻りの計算では FSXLIB-J40 を用いて中性子束分布の計算を実施した。中性子束は VITAMIN-B6 (199 群) に編集して出力した。
	放射化計算	ORIGEN-S (SCALE6.1) DCHAIN-SP2001	ORIGEN-S (SCALE6) では、199 群の中性子束を COUPLE コードに入力し断面積の処理を行った上で計算を行っている。DCHAIN コードについても同様に MCNP5 の結果 (199 群の中性子束) をそのまま入力している。

評価対象	計算分類	計算コード, 断面積ライブラリ	説明
敦賀発電所 1号機 ⁶⁾	中性子束 分布計算	MATXSLIB-J33 TRANSX DORT, TORT	MATXSLIB-J33 を TRANSX で処理して中性子束分布計算に使用している。材料温度は 600K と 300K を設定した。中性子束は 175 群で計算し、結果を 3 群に縮約している。
	放射化計算	ORIGEN-S (SCALE5.1)	3 群に縮約した中性子束を用いて放射化計算を実施している。

4. 放射能インベントリ評価の課題

原電において最近実施した小型の軽水炉（沸騰水型；BWR）の原子炉廻りにおける放射能インベントリ評価において、評価結果の信頼性を検証する上で課題と考えている中性子束分布計算、放射化計算で使用する断面積ライブラリの状況について紹介する。

放射化放射能評価の対象範囲を炉心から生体遮へい壁（BSW）外側までの原子炉廻りを評価対象範囲とした場合、中性子エネルギースペクトルは、核分裂スペクトルが支配的なものから熱平衡のマックスウェル分布が支配的なものまで幅広く変化する（図 3 参照）。この評価において、物量の多いことから放射能インベントリ評価上重要な格納容器内では、中速（熱外）領域が支配的なスペクトルとなっている。また、構造物材料の温度も炉心から BSW では数百度の違いがある。

中性子束分布計算で用いられる多群断面積ライブラリや放射化計算（ORIGEN コード）の放射化断面積ライブラリの作成では、一般的に「軽水炉の標準的なスペクトル（核分

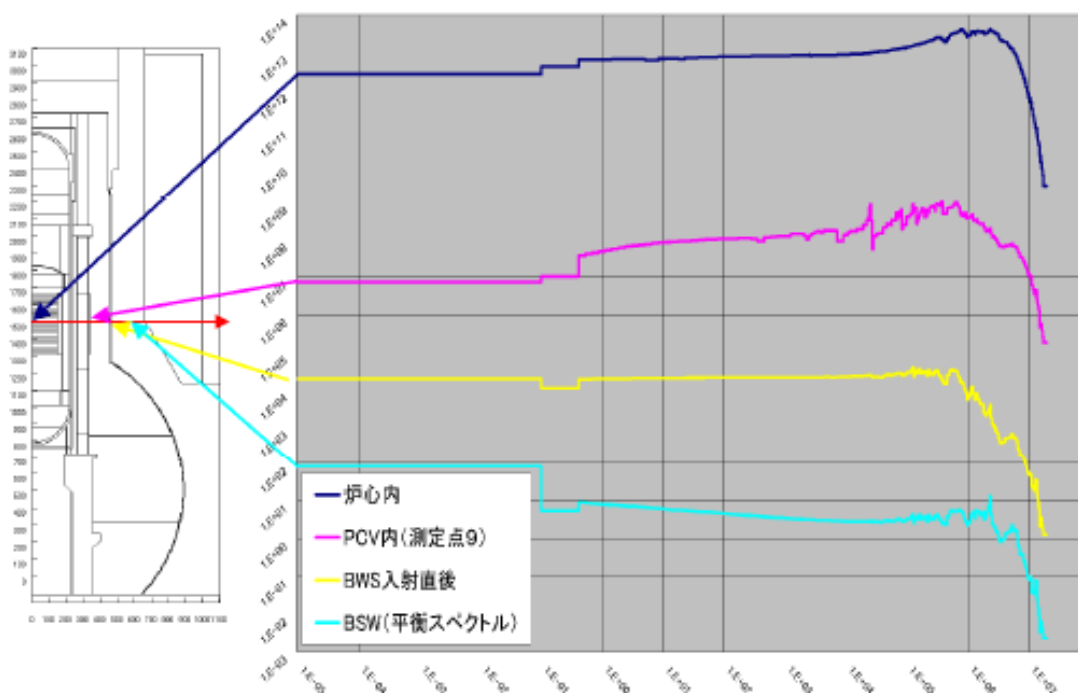


図 3 原子炉廻りの中性子エネルギースペクトルの変化

裂スペクトル-1/v-マックスウェル分布を合成したもの)」のみが用いられている。また、温度についても炉心とその他の構造物材料の数種類が設定されている程度である。

中性子束分布計算で使用している断面積ライブラリは中性子の遮へい評価をするために整備されたものであり、この用途で作成された断面積データでは核分裂で発生した中性子の散乱による減速過程に着目し、熱エネルギーに至るまでの過程は詳細に取り扱われているものの、熱エネルギー領域については少ない群数となっている。物質の放射化では熱エネルギー領域の中性子束が重要であることから、現行の断面積ライブラリを用いた計算では、この点に改善の余地があるといえる。

原子炉廻りの構造物材料は鉄やコンクリートが主成分であることを考慮にいれても、縮約で用いている「軽水炉の標準的なスペクトル」だけでは、現実のスペクトルを適切に再現しているとは言い難い。また、材料の温度条件についても十分とは言えない。

このような断面積ライブラリを使用している状況であっても計算精度に係わる条件「C/M が 1 以上 10 以下であること」を満たす計算は実現できている。ただし、計算結果の信頼性について検証できておらず、評価結果に要求される信頼性に対する断面積ライブラリの影響も把握できていない。

ここに挙げた事項を改善すれば今以上の精度（C/M を今以上に“1”に近いものにする）を実現でき、かつ、計算結果の信頼性に係る情報を得ることができるものと考えている。

以上、ここで述べた通り廃止措置業務で実施する放射能インベントリ評価では、断面積ライブラリとしての核データの利用について改善の余地は多くあるといえる。

5. まとめ

－廃止措置を実施する事業者（エンドユーザ）として核データに望むこと－

原子力発電所の廃止措置に向けた準備作業で実施する放射能インベントリ評価では、核データを中性子束分布計算と放射化計算の断面積ライブラリという形式で利用している。安全かつ合理的な廃止措置の計画立案及び実施には信頼性の高い放射能インベントリ評価が必須であり、その評価結果がもつ信頼性を把握しておくことも廃止措置の安全性や合理性を説明する上で重要である。廃止措置を実施する事業者の説明責任や品質保証上の観点をふまえると次の事項の実施が必要であると考えている。

(1) 断面積が参照する核データの統一

放射能インベントリ評価は中性子束分布計算と放射化計算で構成される。それぞれで用いられる断面積は異なった手順で作成されるものであるが、参照する核データは同じものとしたい。断面積、半減期、原子量及び安定同位体存在比などの参照先は一本化すべきである。原電では、放射能インベントリ評価で参照する核データは JENDL に一本化していくことを考えている。中性子束分布の計算において、JENDL-4.0 はモンテカル

ロ法計算の一部で使用の実績がある。Sn 法においても温度条件や熱エネルギー領域の取り扱いについて上述の課題に対応された MATXSLIB-J40 を使用していく計画である。

また、放射化計算で用いる断面積についても、ORIGEN-S コードで使用可能な JENDL-4.0 による放射化断面積ライブラリを JAEA と共同研究で作成しているところである。

(2) 核データ利用マニュアルの整備

核データのエンドユーザとしては、次の事項が記載された核データ利用マニュアルの整備が望まれる。

- ①「免責事項」：提供されている核データを利用する場合の制限事項を明確にする。ここでいう制限とは、データの取り扱い上想定していない事項のことであり、そのような取り扱いをした場合は評価結果を保証しないといったものである。既存の核データ処理コードを使用している限りこのような事項は発生するものではないと考えるが、ユーザの立場では「使用制限を越えていない」ということを明確にできることが、品質保証上重要なことである。
- ②「信頼性保証」：データが持つ固有の不確かさや断面積を作成していく際の不確かさの伝播など、使用しているデータの信頼性保証に関する情報の提供が望まれる。不確かさの伝播や信頼性保証は、評価対象の特徴に依存するものであることから、多くのベンチマーク計算結果の蓄積によって明確になっていくものであると考える。ユーザから放射能インベントリ評価において実測した結果を提供し、核データの提供者と共同し、これらの情報を充実していきたいと考えている。

参考文献

- 1) IAEA, Evaluating the Reliability of Predictions Made Using Environmental Transfer Models, SAFETY SERIES No.100, (1989)
- 2) 中尾充宏他, “実例で学ぶ精度保証付き数値計算”, 臨時別冊 数理科学 SGC ライブラリ 85, サイエンス社, (2011)
- 3) Takenori SUKEGAWA, et al, ”Accuracy verification for calculation of inventory in JPDR due to neutron activation”, INDC(JPN)-164, (1993)
- 4) 日本原子力発電(株), “東海発電所廃止措置計画認可申請書”, (2006)
- 5) 中村文人他, “新型転換炉ふげん発電所 原子炉本体廻り放射性物質内蔵量の解析コードシステムの構築 (I)”, PNC ZJ3124 98-019, (1998)
- 6) K Tanaka, et al, “Radiological characterization for small type light water reactor”, ICONE19-43234, (2011)