論 文

MOX 燃料加工施設における臨界事象発生頻度概略評価手法の開発

玉置 等史^{1,*}, 木本 達也², 濱口 義兼³, 吉田 一雄¹

Development of Likelihood Estimation Method for Criticality Accidents of Mixed Oxide Fuel Fabrication Facilities

Hitoshi TAMAKI^{1,*}, Tatsuya KIMOTO², Yoshikane HAMAGUCHI³ and Kazuo YOSHIDA¹

¹Nuclear Research Center, 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

²Nuclear Fuel Industries, 1-950 Asashiro-nishi, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-0481, Japan

³Computer Simulation & Analysis Japan, Shibadaimon Daiich Bldg., 1-3-9 Shibadaimon, Minato-ku, Tokyo 105-0012, Japan

(Received September 30, 2009 and accepted in revised form November 30, 2009)

A criticality accident in a MOX fuel fabrication facility may occur depending on several parameters, such as mass inventory and plutonium enrichment. MOX handling units in the facility are designed and operated based on the double contingency principle to prevent criticality accidents. Control failures of at least two parameters are needed for the occurrence of criticality accident. To evaluate the probability of such control failures, the criticality conditions of each parameter for a specific handling unit are necessary for accident scenario analysis to be clarified quantitatively with a criticality analysis computer code. In addition to this issue, a computer-based control system for mass inventory is planned to be installed into MOX handling equipment in a commercial MOX fuel fabrication plant. The reliability analysis is another important issue in evaluating the likelihood of control failure caused by software malfunction. A likelihood estimation method for criticality accident has been developed with these issues been taken into consideration. In this paper, an example of analysis with the proposed method and the applicability of the method are also shown through a trial application to a model MOX fabrication facility.

KEYWORDS: PSA, MOX fuel fabrication facility, criticality, computer-based control system, reliability analysis, software malfunction, index method

I. はじめに

近年、確率論的安全評価 (Probabilistic Safety Assessment, PSA) に代表されるリスク評価技術の向上に伴い、リスク情報を活用した安全規制の導入に向けた検討が進められている。安全規制機関では、運転経験やリスク評価研究の成熟度および評価に必要なデータの蓄積等の観点から、当面は発電用原子炉施設を対象にリスク情報の活用方法について検討するとし、その他の原子力施設については、リスク情報の活用の可能性や課題について検討する¹⁾としている。その他の原子力施設である再処理施設や MOX 燃料加工施設などの核燃料施設は、発電用原子炉施設の事故と比較してその影響は小さいが、施設内の各工程に放射性物質が存在するため、様々な場所で様々な事故の発

生が考えられる。そのため、核燃料施設のリスク情報を得るためには、様々な事故の発生の可能性および影響を評価する必要がある。このような背景の下、筆者らは核燃料施設の 1 つとして、使用済燃料を再処理して得られるウラン・プルトニウム混合酸化物 (Mixed Oxide : MOX) 粉末を軽水炉用燃料に加工する MOX 燃料加工施設を対象とした PSA 実施手順を構築した²⁾。

MOX 燃料加工施設では、火災、爆発、臨界等の異常事象の発生が想定される。例えば火災では、発生条件として、引火点を超えるような継続的な温度上昇と可燃物の存在、また、爆発では、爆発下限値以上の水素濃度、酸素の存在および着火源の存在が考えられ、これら条件が発生する頻度もしくは確率をもとに事象の発生頻度を評価している。実際には、上記条件の成立で火災または爆発が発生するとは限らず、さらに多種の条件が関わらなければ発生しない場合もある。このように火災および爆発では、発生要因として明確化できない不確実な要素があり、事象の発生を詳細にモデル化することは難しい。しかし、核燃料施設

¹ ㈱日本原子力研究開発機構 安全研究センター

² 原子燃料工業㈱ 熊取事業所

³ ㈱シー・エス・エー・ジャパン

* Corresponding author, E-mail: tamaki.hitoshi@jaea.go.jp

では、火災および爆発の発生に対して、その影響を緩和するための対策が講じられている場合が多い。このような種類の事故リスク評価では、発生頻度評価に加え、緩和対策の成功による影響緩和効果もしくは緩和対策失敗確率を考慮することができるため、発生条件で保守的な仮定をおいて発生頻度を評価しても、事故リスクとしては小さく抑えることができ、詳細なモデル化が困難であってもリスク評価上の影響は小さい。一方、臨界が発生した場合、膨大な放射線による影響が施設外に及ぶ可能性が高く、また、初期の急激な核分裂反応に対する有効で動的な影響緩和策がほとんど採れない。このような影響緩和効果等を期待できない臨界のリスク評価では、十分な発生防止策を施しているにも関わらず、発生条件に保守的な仮定をおいた発生頻度評価により事故の重要性の比較において誤った判断を与える結果をもたらす可能性がある。よって臨界については、できるだけ保守性を排除した発生頻度評価が重要となる。

核燃料施設の臨界に対する安全設計では、発生防止に主眼を置き、十分な安全裕度をもった管理値(核的制限値)に基づく運転管理が行われている。臨界は、核的制限値として管理される複数のパラメータ(臨界管理パラメータと呼ぶ)が、機器の故障あるいは運転員の誤操作等で通常運転上取り得る範囲から逸脱し、核的制限値を超え臨界となる値に達することで起こる。したがって、臨界の発生頻度評価では、複数の臨界管理パラメータの管理値と臨界となる値の隔たりの定量化と定量的な関連性を把握するための分析および、どのような故障および誤操作等で臨界状態に近づくかというシナリオの分析が必要である。

核燃料施設で想定される事故の発生頻度評価に関する研究では、再処理施設の水素爆発事故、溶液沸騰事故の例がある。これらの事故の発生を支配する物理パラメータは、それぞれ、水素濃度、溶液温度であり、水素発生速度、溶液の発熱量より、事故の発生条件を比較的容易に分析できる。これに対して MOX 燃料の臨界は、プルトニウム富化度(以降、富化度とする)、MOX 燃料質量、含水率等の臨界管理パラメータの組み合わせで決まる。このような事故の発生条件が、複数のパラメータに依存して変化する事故の発生シナリオおよび発生頻度を評価した事例はない。

臨界管理パラメータの臨界条件に関する定量的分析は、火災、爆発と異なり物理的な臨界のモデル化および関連するパラメータの研究が進んでおり、計算コードを用いた詳細な解析が可能である。

一方、シナリオ分析では、上述の定量的分析結果をもとに関連する機器の故障あるいは運転員の誤操作等の組み合わせを分析する必要がある。国内で建設予定の商用 MOX 燃料加工施設では、臨界および工程管理に独立した2つの計算機を利用した管理計算機システムが導入される予定である³⁾。この管理計算機システムの導入には、運転員の単純な勘違い等のエラーだけで臨界に近づく可能性を十分

に小さくできる大きな利点がある。しかし、管理計算機システムが誤作動すれば、例えば MOX 燃料粉末の設備への連続過剰投入等による臨界の発生が想定される。そのため、シナリオ分析では、単純な計算機の故障だけでなく、計算機間の故障の従属性、計算機と運転員の対応の従属性等を考慮した運転員を含めた管理計算機システムの信頼性を把握することが必要となる⁴⁾。原子力施設のリスク評価においてこのような計算機を中心に構成される管理システムの信頼性を考慮した事例はない。

本報では、臨界計算機を利用した臨界管理パラメータの定量的分析と、MOX 燃料加工施設の臨界管理の特徴である管理計算機システムの信頼性評価を含めたシナリオ分析からなる臨界発生頻度評価手順を提案し、それに基づき MOX 燃料加工施設のモデルプラントを対象に実施した具体的な評価例を示す。

なお、本報には、経済産業省からの委託を受けて実施した、「MOX 燃料加工施設安全技術調査等(確率論的安全評価等調査)」の成果が含まれている。

II. 臨界事象の発生頻度の評価手順

MOX 燃料加工施設の臨界管理の特性や発生頻度評価上の課題を踏まえ、本報で提案する臨界発生頻度評価手順は、**Fig. 1** に示すような4つのステップで構成される。各ステップは、評価の効率化向上のために行う臨界発生の可能性のある設備の選出、管理値と臨界となる値の隔たりの定量化および定量的な関連性の把握(臨界特性の分析)、管理

Fig. 1 Procedure for criticality likelihood evaluation

計算機システムの信頼性評価を含めた臨界管理パラメータの管理失敗シナリオの分析(逸脱シナリオの分析)、臨界に至るシナリオの分析およびシナリオの定量化(臨界発生頻度の評価)である。

以下では、Fig. 1 に示す各ステップの概要について説明する。

1. 臨界発生の可能性のある設備の選出

MOX 燃料加工施設の各設備では、次のような臨界の発生を防止するための管理方法が採られている。

- 核分裂性物質質量を制限する質量管理
- 中性子減速効果のある物質を制限する減速材管理
- 取り扱う MOX 燃料組成に応じて設備の寸法を制限する形状管理

これらの管理は、核燃料物質を取り扱う単位(例えばグローブボックス等の設備や容器であり、ユニットということ)ごとに考慮される。

質量管理および減速材管理では、運転員や計算機によりそこで取り扱う核分裂性物質質量および減速材量を制御している。このようなプロセス量を外部より能動的に制御することを動的な制御と呼ぶ。動的な制御では、異常やミスで臨界の可能性が想定されることから、動的な制御で臨界を防止するユニットを評価対象として選出する。

形状管理で臨界を防止するユニットは、運転上のプロセスパラメータの変動に設計段階で設けた形状や配置の制限が左右されないこと、地震などの外的要因を除き、クレーンやリフト等の搬送機器の接触により臨界の原因となる破損には至らないことから、通常状態からの逸脱により臨界に至るシナリオ(以降、臨界発生シナリオとする)が想定できない。本報で提案する臨界発生頻度評価は、通常状態からの逸脱を原因とする臨界を対象とするため、形状管理で臨界を防止するユニットは検討対象から除く。

2. 臨界特性の分析

MOX 燃料の核分裂性物質質量は、核種組成比、富化度、MOX 燃料質量をもとに算出される。このうち核種組成比は工程を通じてほとんど変化しないこと、およびプルトニウムによる核分裂性物質質量が MOX 燃料中の核分裂性物質質量の大部分を占めることから、核分裂性物質質量は、実質的には富化度および MOX 燃料質量で管理される。臨界特性の分析では、これら 2 つの値に減速材管理対象のうち運転中に変動する添加剤投入量を加え、合計 3 種類の臨界管理パラメータに着目し、これらの変化と臨界状態との関係を臨界計算コードを用いて分析する。この他、質量管理に関係するパラメータとして燃料の密度変化が挙げられるが、工程中には、ペレット成型工程の造粒およびプレス以外大きな密度変化はなく、MOX 燃料粉末を容器内に押し込むような作業もないことから、製造工程での通常の燃料物質の粉末からペレットへの変化以外に、密度が大

きく変化することは考え難い。そこで、臨界計算では、粉末状態とペレット状態の密度には、想定される値のばらつきを考慮して保守側の値を用いる。

富化度の管理では、原料 MOX 燃料粉末に UO_2 粉末を混合して、製品として要求される富化度になるよう調整する。そのため、富化度はなんらかの管理の失敗により管理値間の中間的な値を取り得る。しかし、解析上は発生し得る臨界状態を包含した結果が得られるように施設受入許容上限富化度、工程内受入許容上限富化度および最終製品の上限富化度の 3 通りの解析を行う。

質量管理としての各工程でのユニットへの燃料の受け入れの管理は、容器単位で行われるので、ユニット内の MOX 燃料質量はステップ状に増えるが、連続的に変化するものとして解析を行う。

添加剤投入量の管理値は、MOX 燃料質量と一度に添加できる工程上設定した許容含水率と同等な中性子減速効果のある添加剤質量である。添加剤の投入もバッチ単位で行われるため、ステップ状に増えていくが、解析では連続的に変化するものと仮定する。

以上より、富化度の違いをパラメータに MOX 燃料質量と含水率を変化させて臨界状態になる組み合わせを求める。

3. 逸脱シナリオの分析

ここでは、II-2 節で着目した MOX 燃料質量の質量管理および添加剤投入管理に失敗するような機器の故障もしくは操作の失敗の組み合わせ(これを逸脱シナリオと呼ぶ)について分析する。質量管理は、管理計算機システムおよび運転員により行われる。管理計算機システムでは、受入容器の重量や ID の確認、ユニット内管理質量以下の確認、容器移動に関する制御など様々な管理を行い、また、運転員は、容器の移動に関して、容器の確認や移動許可の判断等を行う。このため、シナリオの分析では、単純な管理計算機システム内機器の故障と運転員のエラーの組み合わせでなく、運転員も管理計算機システムを構成する 1 つの要素と捉え、各構成要素がもつ機能の喪失が管理計算機システムの機能にどのような影響を与えるかを管理計算機システムの制御ロジックに基づいて分析し、質量管理失敗に至るシナリオを同定する手順を提案した⁵⁾。また、計算機の機能喪失の原因にはハードウェアの故障とソフトウェアの異常が想定されることから、計算機の信頼性を評価するには、ハードウェアの信頼性に加え、ソフトウェアの信頼性を評価する必要がある。発電用原子炉施設においても従来の制御機器をデジタル制御機器に変更しており、ソフトウェアの信頼性評価が重要視され、その評価方法の検討が進められているが⁶⁾、供用後にランダムに発生するようなソフトウェアの異常を予測する方法として技術的な合意は得られておらず、また、施設ごとに設計されるようなソフトウェアでは、故障確率や失敗確率のような定量的な信頼性パラメータを整備することも現実的に困難であ

る。このことから、計算機の機能を喪失させるような故障モードに関しては、ハードウェア、ソフトウェアと区別せず計算機が質量管理の失敗に至るような管理計算機システムの機能喪失の原因となる故障モードを計算機の故障モードとして同定する。管理計算機システムの機能喪失シナリオおよびシーケンスの分析を以下の手順で行う。

- (1) 運転員、機器および計算機を構成要素とする管理計算機システムの情報処理の流れを整理する。
- (2) 情報処理の流れに従い、構成要素ごとの成功/失敗をイベントツリーで表現する。
- (3) FMEA 等を用いて構成要素ごとに想定する故障や異常が原因で引き起こされる管理計算機システムの機能喪失の種類を同定するとともに、管理計算機システムの機能喪失につながるシーケンスを抽出する。また、ある構成要素の機能喪失に対する他の構成要素の応答を分析し、構成要素間の従属性の有無およびその従属程度を分析し、構成要素間に従属性が認められた場合、管理計算機システムの機能喪失につながるシーケンスを修正する。
- (4) 機能喪失が発生するシーケンスをその機能喪失の種類ごとにグループ化する。

4. 臨界発生頻度の評価

II-2 節で得られる富化度一定の場合の臨界と判断する質量と含水率の組み合わせに対し、分析対象ユニットにおける通常の運転で取り扱われる MOX 燃料質量と許容含水率がどの程度の裕度をもつか分析する。次に分析対象ユニットで行われる質量管理や添加剤投入管理に失敗すると、どの程度臨界条件に近づくかについて分析する。以上の分析より得た裕度と逸脱の度合いをもとに、どのような逸脱シナリオの組み合わせにより臨界条件に至るかを分析し、臨界発生シナリオを同定する。

次に II-3 節より得られる管理計算機システムによる質量管理の失敗シナリオおよび運転員による添加剤投入管理失敗シナリオに対して、それぞれの発生確率を求める。これをもとに、失敗の組み合わせを考慮した各シナリオの発生確率を求める。最終的に求める臨界発生頻度は、臨界発生確率に対して、想定年間作業回数を乗じることにより得られる。

以下では、質量管理の失敗確率を推定する上で重要となる管理計算機システムの信頼性の定量化方法について述べる。

管理計算機システムは、計算機、秤量器等ハードウェア部分と情報の処理を行うソフトウェア部分で構築されている。このような複合システムの場合には、ハードウェアとソフトウェアに分けて信頼性評価を行う場合が多い。メモリ、ハードディスク、CPU といった計算機を構築するハードウェアの信頼性評価については、メーカー公表の平均故障時間間隔や、米国にて収集された故障率⁷⁾などによ

り評価可能である。一方、ソフトウェアの信頼性については、航空、宇宙、原子力等の分野で重要視されており、その評価方法として、様々な方法が提案されている。現在、発電用原子炉施設のデジタル制御機器のために提案されているソフトウェアの信頼性評価手法は、およそ次の 5 つに分類できるとされている⁶⁾。

- (1) デバック期間におけるバグの発見とその修正作業もしくはソフトウェアの使用時間とバグの発生件数によりソフトウェア中に残る欠陥を推定する信頼性成長モデル
- (2) 運転状況に応じた入力によるプログラムのテスト結果に基づく推定モデル
- (3) ベイズの信頼ネットワーク⁸⁾等によりプログラムの取り得る状態を推定し、主観的な条件付き確率を利用する推定モデル
- (4) プログラムのライン数や判定数などの客観的観測に基づく推定方法
- (5) ソフトウェアの開発における各過程において、規制等が要求する事項を満足することで信頼性レベルを定性的に確認し、工学的判断にて失敗確率を割り当てる方法

しかし、Aldemir ら⁹⁾は、将来の故障等をよく予測できるかといった一般的な信頼性評価モデルに要求される項目、デジタル計測制御機器の性質から信頼性評価上必要と考えられる要求項目等ソフトウェアの信頼性評価を行う上で重要と考える 11 項目を選出し、前述した種類の手法の単独使用では、これらすべての要求を満たすことはできなかったとしている。さらに、利用施設ごとに設計されるようなソフトウェアでは、信頼性に関わる運転データ等の取得や、他のソフトウェアの失敗確率等の信頼性パラメータの援用等に統一的な見解がなく、現時点での失敗確率の定量化は困難である。

筆者らは、MOX 核燃料加工施設の PSA 手法として概略的にリスクを評価してリスク上重要な事象を選別し、それらに対して詳細な評価を行う 2 段階の評価手法を提案している²⁾。重要事象選別のための概略的なリスク評価における発生頻度評価では、工程内の設備・機器の機能を喪失させるような代表的な故障モードとその発生頻度または確率、発生した故障等を原因とする異常事象の発生を防止する対策の失敗確率および事故に進展させないための対策の失敗確率のおおよそを評価する。失敗確率のおおよそを評価する方法として、評価対象の管理方法や運転経験から失敗確率のオーダーを評価する index method¹⁰⁾を利用している。本報では、文献¹⁰⁾を参考に **Table 1** に示す単純化した失敗確率指数を提案する。Table 1 を用いて、管理計算機システムを構成する機器、運転員および計算機の代表的な故障モードを想定し、それぞれの故障モードの発生確率もしくは故障等を原因とする異常事象の進展防止の失敗確率のオーダーを評価する。計算機の失敗確率は、II-3

Table 1 Index of failure probability

Index of failure probability	Based on type of control
-3	A single passive engineered control or an active engineered control with high availability
-2	An enhanced administrative control, or an administrative control for routine planned operation
-1	An administrative control that must be performed in response to be rare, unplanned demand

節で想定した故障モードの発生の可能性を Table 1より失敗確率指数として求める。この際に、計算機の役割を従来のアナログ機器等で構成した場合の故障確率は、計算機の失敗確率の決定の参考になる。つまり、機器の性質が能動的か受動的か、冗長性をもつかのような情報を参考に故障確率を Table 1より選出し、計算機の失敗確率はその機器と比較し、信頼性が向上しているか、もしくは同程度の信頼性かといった相対的な判断をもとに、計算機の失敗確率を得ることができる。以上の分析より得られる管理計算機システムの構成要素の機能喪失確率に基づき管理計算機システムの失敗確率を求めることが可能となる。

また、添加剤投入失敗確率の定量化については、質量管理失敗確率の定量化方法と同様、添加剤投入失敗シナリオの構成要素に Table 1の失敗確率指標を割り当てる。

III. モデルプラントを対象とした試解析

国内外の MOX 燃料加工施設の公開情報をもとに想定した MOX 燃料加工施設のモデルプラント¹¹⁾に対して II 章で示した手順に基づき臨界発生頻度の概略評価を試行した。

1. 臨界発生の可能性のある設備の選出

モデルプラントにおいて動的な制御で臨界を防止するユニットは、MOX 燃料粉末の混合・調整を行う予備混合、一次混合、最終混合および造粒の各ユニット、ペレットのプレスから焼結、研削および検査を行う各ユニット、ペレットを燃料棒に装填するユニット、スクラップを取り扱うユニットである。

2. 臨界特性の分析

ここでは、まず各ユニットにおける臨界特性を分析するための臨界計算条件を決定した。なお、決定した臨界計算条件は、概略評価の効率性を考慮し 1 つの臨界計算でできるだけ多くの設備でシナリオが検討できるようにした。臨界管理パラメータは、富化度、MOX 燃料質量、および添加剤投入量で決まる含水率である。これらの臨界管理パラメータを用いて臨界と判断する境界について解析した。一般的に k_{eff} が 1.0 であるとき臨界であると判断している。しかし、解析プログラムの計算結果が 1.0 であると

き、解析条件の不確かさ、誤差等により臨界を超過している可能性を否定できない。そのため、核的制限値等の具体的な管理条件を決定する際には、0.95 など 1.0 より小さい値を利用している。本試解析では、 $k_{\text{eff}} = 1.0$ を臨界の判断基準とし、これにより求めた臨界条件では、現実のユニット、運転条件では臨界に達しないことを担保するために、MOX 燃料の取り得る形状および構造材等による中性子の反射効果を保守的に仮定した。

(1) 計算形状および水反射体の設定

モデルプラントでは、動的な制御で臨界を管理する容器すべてが分析対象となるが、ここでは、様々な形状の容器を包絡し、中性子の漏れが最も少なくなる球を仮定した。中性子の周辺構造材等による反射効果は、水の層に換算して計算する場合が多い。浸水の恐れのない系の臨界安全評価では、一般的に周囲の壁を除いた周辺の構造材等の中性子反射効果を考慮して 2.5 cm の水反射体を設定する¹²⁾。しかし、本解析では、運転員が近接する可能性もあり、また、保守時に反射効果のある物質が誤って放置される可能性も否定できないことから、水没条件も包絡する 30 cm 水反射条件を採用した。

(2) 燃料に関する条件の検討

MOX 燃料加工施設では、 UO_2 粉末は、再処理により回収される回収 UO_2 と、富化度を調整するため劣化 UO_2 粉末を用いるが、解析上は、臨界安全上厳しくなる濃縮度の高い回収 UO_2 の組成比¹³⁾を用いた。プルトニウムの組成比は軽水炉用 MOX 燃料として臨界安全上厳しくなる組成比を用いた¹⁴⁾。添加剤のステアリン酸亜鉛の中性子減速効果は、静かに添加したときのステアリン酸亜鉛の密度 (0.3 g/cm^3)¹⁴⁾をもとに核的に等価となる 0.31 g/cm^3 の水が添加されたものとして模擬した¹⁵⁾。

試解析での MOX 燃料の形態は、動的な制御で臨界を防止するユニットで取り扱う粉末もしくはペレットとする。粉末であるとき密度が高いほど臨界安全上厳しくなることから、容器に振動を与えた際の MOX 燃料粉末のかき密度の実測値が $3.4 \sim 3.8 \text{ g/cm}^3$ である¹⁶⁾ことより、MOX 燃料粉末の密度を 4.0 g/cm^3 とした。焼結ペレットの密度は、 UO_2 より PuO_2 の理論密度が高いことおよびペレットの密度は理論密度の 94 から 96% であることから PuO_2 の理論密度 (273 K 時 11.46 g/cm^3)¹⁷⁾に 96% を乗じ 11.0 g/cm^3 とした。グリーンペレットの密度は保守的に焼結ペレットの密度と同じとした。

粒径の異なる 2 種類の粉末を混合する場合、添加した量に応じて体積が増えるケースと大きい粒径の粉末の隙間 (空隙) に小さい粒径の粉末が入り込み混合前の体積と変わらないケースが考えられる。一方、臨界安全上は、空隙に添加剤が侵入すると仮定したモデルが、添加による体積増加がないため中性子の漏れが少なく厳しい結果を与える¹⁴⁾。このことから、解析では添加剤が MOX 燃料粉末の粒子間に侵入するケースを採用し、ペレット密度と同等

である 11.0 g/cm^3 になるまで体積変化はないとした。

また、溶液では混合途中で臨界に達し、その後均一になり臨界停止になった事例¹⁸⁾があるが、粉末体系においては混合が進む、つまり均一に近づくにつれ中性子実効増倍率が大きくなる¹⁵⁾ことから、解析上 MOX 燃料粉末と添加剤が均一に分布しているとした。

(3) 臨界管理パラメータの範囲に関する検討

富化度は、モデルプラントの場合、文献 3) を参考に、原料粉末受入許容上限富化度を 50 wt%，工程内受入最大許容上限富化度を 33 wt%，製品の上限富化度を 18 wt% とした。富化度 50 wt% 以外の富化度における k_{eff} が 1.0 となる MOX 重量と含水率組み合わせを臨界計算コード MCNP-4C¹⁹⁾ を用いて求めた。富化度 50 wt% 時の臨界の可能性は次に挙げるような状況が発生した場合である。

- ・ 富化度 50 wt% の容器と工程内で用いる容器が設備容量上異なるため容器形状も異なり工程内に富化度 50 wt% の容器がそのまま受け入れられる可能性は著しく低いことから、富化度 50 wt% の MOX 燃料粉末が工程内に存在するには、 UO_2 粉末による 33 wt% 富化度への希釈に失敗した場合である。
- ・ 次の富化度希釈設備である最終混合ユニットまでは、混合作業がないため質量増加の機会がなく、その間にもサンプリングによる分析作業が想定されることから、最終混合ユニットに富化度 50 wt% の MOX 燃料粉末が到達するには、分析作業による富化度異常の検知に失敗した場合である。
- ・ 臨界に至るには、誤って存在する複数の富化度 50 wt% の容器が同時に最終混合ユニットに搬入された場合である。

これらの主な原因は、管理計算機システムの機能喪失であり、管理計算機システムの信頼性が高ければ、主工程内に富化度 50 wt% が存在する可能性は極めて低いと考えられる。このため管理計算機システムの信頼性評価を行った後に必要に応じて富化度 50 wt% 時の臨界の可能性を検討することとした。

Figure 2 には、**Table 2** の条件をもとに計算した富化度 33 wt% のときの中性子実効増倍率が 1.0 となるときの MOX 燃料質量と含水率の関係を示す。なお **Fig. 2** では含水率 5 wt% までを示す。これは MOX 燃料粉末の空隙に添加剤がペレット密度と同等になるまで詰め込まれたときの含水率が約 5 wt% であり、これ以上含水率が増えても体積増加により中性子の漏れが多くなり、 $k_{\text{eff}}=1.0$ となるときの MOX 燃料質量が増え臨界条件になり難いためである。また、含水率が 5 wt% 以上に達するには、1 回の作業で誤秤量を考慮しても約 2 日分の投入量に相当する添加剤を手動で投入するといった運転員のエラーの発生が必要となり、この状況の発生の可能性は極めて低いため、本分析ではこれ以上の含水率について考慮する必要はないと判断した。

Fig. 2 Relation between MOX powder mass and water content ratio on $k_{\text{eff}}=1$ at 33 wt% of Pu enrichment

Table 2 Parameters and conditions for criticality analysis

Parameter & condition	Value
Geometry	Sphere
Reflection	Water, 30 cm thickness
Isotope composition ratio for Pu	$^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu} = 71/17/12$
Isotope composition ratio for U	$^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 1.6/98.4$
Density	Powder : 4.0, Pellet : 11.0 g/cm^3
Pu enrichment	18, 33 wt%
Water Content ratio	5 wt% (Max)
Volume	400 L (Max) (corresponding to 1,600 kg MOX)

3. 逸脱シナリオの分析

臨界特性の分析より得た **Fig. 2** より、最小 MOX 燃料質量は、含水率 5 wt% のときで約 240 kg MOX である。主工程内では、通常運転では、富化度は 33 wt% が最大であることから、最大取扱質量が 240 kg MOX 未満のユニットでは、臨界を想定できないと判断できるが、保守的に、最大取扱質量が 200 kg MOX 以上のユニットを検討対象とした。モデルプラントでは、最終混合槽と焼結炉がこの条件に該当した。以下では、モデルプラントで取扱量が最も多い最終混合槽における臨界管理方法、それにより考えられる質量管理および添加剤投入管理の逸脱シナリオの分析結果を示す。

(1) 最終混合槽における臨界管理

モデルプラントの最終混合ユニットは、粉末調整工程の最後の希釈混合を行う。本ユニットの概略図を **Fig. 3** に示す。このユニットでは、1 バッチの作業として、33 wt% 富化度以下の最大 60 kg MOX の MOX 燃料粉末缶を 4 缶 (最大 240 kg)、20 kg 希釈用 UO_2 粉末缶を 5 缶 (最大 100 kg) 受け入れ、目的の富化度に調整し、均一にした粉

Fig. 3 Schematic of the final blending unit

末(最大 340 kg)を 85 kg まで収容できる容器に分取した後、次の工程に払い出す。この作業は 1 日 2 回行われる。再処理施設より受け入れた MOX 燃料粉末の含水率は、0.2 wt%¹⁶⁾程度であるが、ここでは、0.5 wt%とした。また、添加剤の投入は最終混合以前の操作で 1 回、本ユニットにて 1 回、合計 2 回行う。1 回の添加剤投入量は、含水率換算で 0.5 wt%以下に制限する。最終混合粉末は、添加する含水率 1 wt%を加え 1.5 wt%の含水率まで許容する。このような通常運転で取り得る MOX 粉末燃料質量および含水率の範囲を Fig. 2 の網掛けで示す。

MOX 燃料粉末缶の受け入れおよび混合後の払い出しは、管理計算機システムによって管理される。管理計算機システムは、類似施設における臨界管理計算機システム²⁰⁾を参考に、秤量器等の機器、運転員、運転管理計算機および臨界管理計算機のネットワークにより構成されるものとし、そこでの管理計算機システムの情報の流れを Fig. 4 に示す。移動対象となる容器は、前ユニットから払い出される際に、すでに、容器の識別番号(ID)の読み取り、秤量、2 つの計算機による中間貯蔵庫の核的制限値以下であることの確認の後、中間貯蔵庫に移動されるとともに、容器情報を管理するデータベースは、更新されている。運転員 1 が移動対象の容器の ID を運転管理計算機に入力すると、運転管理計算機では、指定された容器について運転計画に従った移動であることおよび移動先が臨界管理上受け入れ可能であるかが確認され、臨界管理計算機でも移動先が臨界管理上受け入れ可能であるかが確認される。両計算機により容器の移動が可能と判断されれば、対象の容器が中間貯蔵庫より払い出され受入ポートの直前まで移動される。受入ポートの直前でもう一度容器の ID、重量が確認され、その結果が、許可を与えた容器と同一であると運転管理計算機により判断されると、運転員 1 に移動可能であることが表示され、運転員 1 はその情報を受けて移動許可を入力する。これを受けて臨界管理計算機

により容器の同一性が確認されたのち、受入ポートの入口シャッターが開けられる。移動先ユニットで受け入れられた MOX 燃料および UO₂ 粉末は、ユニット内での混合等の作業を経て、一時的に保管する中間貯蔵庫に払い出される。

添加剤の投入に関しては、あらかじめ運転員により投入量を秤量し容器に入れられた添加剤が添加剤投入用グローブボックスに受け入れられ、運転員の手作業により投入される。

(2) 質量管理逸脱シナリオの検討

MOX 燃料の移動に関わる処理の流れをイベントツリー上に表現したものを Fig. 5 に示す。なお、受け入れた容器は直ちに混合機投入口に運ばれ、MOX 燃料粉末が投入されるものとした。Fig. 5 上の略語は以下のように決めた。ユニット内作業後の ID の識別と秤量を ID 確認 1、受入ポート前での ID 識別および秤量を ID 確認 2 とした。また、運転管理計算機を計算機 1、臨界管理計算機を計算機 2 とし、それぞれの計算機で、運転員が入力した情報から移動先ユニットが受け入れ可能かを判断するソフトウェアをそれぞれ soft1a, soft2a、識別した ID とデータベースを比較するソフトウェアをそれぞれ soft1b, soft2b とした。なお、計算機 2 の出力情報は、運転員 2 が監視している。計算機 2 の故障モードとしてハードウェアの故障、もしくは情報の処理失敗や入力および出力の消失を想定した場合、管理計算機システム内の情報処理が中断することで、異常が顕在化し運転員 2 による異常の検知に関わらず移動作業は中断される。これに対して、移動作業を中断させないような計算機 2 の故障モードとして、情報の処理に失敗しているにも関わらずあたかも正常に処理したように情報を出力する状況を想定した場合、運転員 2 が監視している表示は通常と変わらないことから運転員 2 は異常を検知できない。このことから、soft2a の情報処理失敗に対する運転員 2 の監視は期待できない。一方

Fig. 4 Process flow of the computerized control system

Fig. 5 Event tree for analysis of function failures of the computerized control system

soft2b の出力に対して、運転員 2 は移動する容器を工程監視モニタにより確認できることから、イベントツリー上に運転員 2 (確認) として示した。

次に、イベントツリー上の分岐に関わる、各構成要素の故障モードについて分析した。ここでは、発生した異常が管理計算機システム内を伝播し、管理計算機システムの機能喪失につながるような各構成要素の故障モードを同定した。ID 確認の失敗では、機器の故障により ID が読めないといった故障ではなく、誤った情報を計算機に伝えるという故障を想定した。コンベアによる移動では、静止できず次の受入ポートまで容器を移動してしまう故障を想定した。運転員の失敗としては、入力ミスや確認ミスを想定した。シャッターの故障として、間違った容器の受け入れが可能となるような閉失敗を想定した。計算機の故障モードには、運転員 2 (確認) で説明したように、情報の処理が正しくないにも関わらずあたかも正常に処理したように情報を出力する状況を選出した。このような計算機の故障モードを以下では「偽正常」と呼ぶ。

情報処理の流れおよび各構成要素の故障モードに対するシステムの応答から、管理計算機システムの機能喪失につながるシーケンスを同定した。このとき、以下の構成要素については、それ以前の構成要素で想定する故障や異常との従属性が強いとし、その成功/失敗を以下のように仮定した。

- 計算機 2 の出力が「偽正常」である場合、監視している運転員 2 は 1 度「偽正常」を検知する機会があるが、1 度検知に失敗すると思ひ込みにより次の異常検知の機会も失敗するとした。つまり、soft2a で「偽正常」が発生した場合、運転員 2 は情報処理異常の発見ができず、運転員 2 (確認) も失敗するとした。
- 運転員 1 が間違えた ID を入力した状況 (運転員 1 (入力) 失敗) で、容器の ID が正常に読み取れた場合、運転員 1 は気付かないが、容器の ID の読み取りに失敗した場合には、自身が入力した値との違いに気付く可能性があるため、計算機 (soft1b) の情報処理異常に気が付く可能性がある (運転員 1 (指示) にて異常発見成功の可能性あり) とした。
- soft2b に「偽正常」があると移動許可信号が発信されるため、移動許可信号を受けた受入ポート前のシャッターが開くとした。
- データベース (DB) 更新の失敗には、新しい情報が消失している状況を想定するため、古い情報をもとに受け入れ可能かを計算機が判定し、その結果受け入れ可能となる。よって DB の異常は、soft1a, soft2a から検知できないものとした。つまり、DB 更新失敗時には soft1a, 2a の分岐は考慮しない。
- DB 更新失敗時には、運転員 1 による移動容器の ID 入力の成功/失敗に関わらず移動が可能と判定

し、運転員 1 による入力の成功/失敗はシーケンス上意味をもたないため、分岐は考慮しない。

イベントツリーより得られた管理計算機システムの機能喪失に至るシーケンスを機能喪失により引き起こされる異常状態の形態から、計画外容器や重量超過容器を受け入れる異常状態 (異容器受入) および ID 読み取り失敗やデータベースの異常により受け入れ先のインベントリ情報が現実より少ないと判断されてしまい過剰に容器を受け入れる異常状態 (受入容器不明) に分類し、それぞれを質量管理逸脱シナリオとした。

(3) 添加剤投入管理失敗シナリオの検討

添加剤は、運転員が秤量器により投入量を秤量し工程内に投入する。よって、添加剤投入管理失敗の原因は、運転員による過剰投入、秤量器の故障または運転員による秤量の失敗による投入量管理の失敗および運転員による過剰投入の組み合わせであるとした。

4. 臨界発生頻度の定量化

臨界特性の分析結果および最終混合槽の臨界管理方法より、臨界発生シナリオを分析した。分析にはイベントツリーを用い、臨界発生に至る失敗シーケンスを同定した。また、臨界発生シナリオを構成する質量管理逸脱シナリオおよび添加剤投入管理逸脱シナリオの発生確率を Table 1 に示した失敗確率指数をもとに決定した。決定した値をもとに得た各シーケンスの発生確率は、その発生しやすさの相対比較に用いた。各シーケンスの発生頻度は、イベントツリーに与えた確率指数の合計と年間作業回数より得た。

(1) 臨界発生シナリオの分析

Figure 2 から想定できる臨界発生シナリオを質量管理の失敗、添加剤投入管理の失敗、およびそれらの組み合わせに分けて、考えられる臨界発生シナリオを分析した。ここでの分析では、まず、臨界に至る可能性が高い 33 wt% 富化度に着目した。検討した臨界発生シナリオの関係を Fig. 6 に示す。

- 33 wt% 富化度 MOX 燃料粉末の誤投入のみによる臨界発生シナリオ

Figure 2 より、このシナリオでは 2 バッチ以上の投入で臨界に至る。1 バッチは 4 回の MOX 燃料容器を受け入れて投入する作業であるから、通常量に加え 4 回以上容器の受け入れ・投入を繰り返すと臨界に至る可能性がある。もしくは希釈用 UO_2 粉末が未投入で、かつ混合後の MOX 燃料粉末の払い出しを忘れた後もしくは機械の故障等で払い出しができなかった後、次のバッチの通常量の MOX 燃料の投入を行えば、臨界に至る可能性がある。

- 添加剤の過剰投入のみによる臨界発生シナリオ

Figure 2 より含水率 5 wt% で、臨界に至る可能性があることがわかる。1 回の添加剤投入により 0.5 wt% 含水率が上昇することから、このシナリオでは、通常投入量に加え、およそ 7 回分誤投入 (3.5 wt%) されるか、もしくは投

Fig. 6 Event tree for developing criticality accident scenarios at 33 wt% Pu enrichment at the final blending unit

入量の誤秤量により1回の投入量が通常量の倍(1 wt%)になると仮定した場合、誤秤量した添加剤を4回誤投入(4 wt%)すると臨界に至る可能性がある。しかし、当該ユニットでの運転は、その容量から1日2回程度の混合作業が想定され、1日(2バッチ分)の投入量を1回で投入しても2.5 wt%程度の含水率にしか達せず、このシナリオの可能性は極めて小さい。

- 33 wt% MOX 燃料粉末の誤投入と添加剤の誤投入による臨界発生シナリオ

このシナリオでは、33 wt%の MOX 燃料粉末缶および添加剤を過剰に投入する場合を想定した。ここでは、取扱総質量についても管理していると仮定した場合、投入すべき UO₂ 粉末質量分(100 kg)の代わりに間違えて MOX 燃料粉末を投入するケースが想定される。MOX 燃料粉末缶は1缶最大 60 kg の MOX 燃料粉末が納められているため、分取装置をもたないこのユニット内では、UO₂ 粉末質量分の 100 kg に近い MOX 燃料粉末缶2缶(120 kg)を投入し、もともとある 240 kg に 120 kg を加えて 360 kg に達するとした。この状態で、さらに添加剤投入を3回誤投入もしくは誤秤量された添加剤を2回誤投入すると臨界に至る可能性がある。

(2) 質量管理逸脱シナリオの定量化

Figure 5 のイベントツリーをもとに、質量管理失敗に至る各シーケンスを定量化する。まず、運転員の対応と機器の動作の各失敗の種類より発生確率を指数で決定する。ID 確認は、ID の読み取りと秤量の組み合わせであることから、高信頼性の能動的手段による制御の失敗確率として-3、運転員の入力作業である運転員1(入力)は通常作業であることから-2、ソフトウェア異常を検知する運転員

1(指示)および運転員2(確認)は異常時対応であることから-1、移動用搬送装置は電源断で停止するので、停止不可となるような移動の分岐には、高信頼性の制御の失敗として-3、シャッターの閉失敗確率は、単一の能動的手段による制御の失敗として-2とした。

次に計算機の失敗確率を求める。一般的にソフトウェア内で異常が発生した場合を想定して、異常をソフトウェア内部で検知する手段が組み込まれている。また、プログラムの異常でデータがプログラム内ループに陥った場合、データ処理も停止すること、本来実行されるべきプログラムの一部が実行されなかった場合のソフトウェアの出力は明らかに異常である可能性が高いことから、管理計算機システムにおける計算機の信頼性は十分に高いと判断できる。そこで、発見が難しい「偽正常」の発生に関しては、十分に信頼性の高い制御の失敗確率-3に、出現の可能性の低さを加味して-4とした。また、soft1, 2は異なるソフトウェア開発者が担当すると仮定し、softa, b間は、異なる作業を受け持つので、これらの2組のイベント間に従属性はないとした。

以上、管理計算機システムを構成する各要素の失敗確率指数を Fig. 5 のイベントツリーに記入し、MOX 燃料の過剰投入に至る各シーケンスの発生確率を求めた。MOX 燃料粉末を過剰に受け入れる可能性があるシーケンスのうち、発生の可能性が比較的高いものは、Fig. 5 より、シーケンス番号 Sa1 の移動指示と異なる容器が移動されて、異なる ID を確認したが2つのソフトウェア上で検知されずに移動許可を出す場合(-9)と、シーケンス番号 Sa2 の搬送装置が故障し、ID 確認を行えないまま次のユニットへ移送し、このときに受け入れを制限するシャッターが開

いたままであるような場合(-8), の2通り考えられる。ただし, これらのエラーにより移送される容器は1つであり, さらに過剰に供給するには同じシーケンスの繰り返しもしくは他のエラーで構成される誤移送発生シーケンスが必要となる。

連続して過剰に受け入れる可能性のあるシーケンスのうち発生の可能性が高いものは, Fig. 5のシーケンス番号Sa5に示す容器の移送に対応して2つのデータベースの更新が行われず, さらに古いデータベースとのID照合でその異常が検知できないようなソフトウェアのエラーの発生が重なる場合(-13)が想定される。ただし, この場合でも, 複数の容器移動入力が必要となるため, 運転員による誤移動の入力が必要となる。ここでは, Fig. 6のMOX燃料の2容器および4容器の誤投入の発生確率として, ともに入力作業失敗の-2を加え, -15とした。

(3) 添加剤投入管理逸脱シナリオの定量化

添加剤投入管理失敗シナリオはFig. 6に示した添加剤秤量の失敗, 添加剤投入の失敗およびそれらの組み合わせにより構成される。添加剤の誤秤量の発生確率は, 2回投入量相当を1回分として秤量する失敗であることから, 秤量器の故障や誤表示といった機械的故障よりも運転員の勘違いや作業の省略が主になると判断し, 通常作業時の失敗確率である-2とした。運転員の誤投入には, 通常作業時の失敗であるので, -2の失敗確率を割り当てた。3回以上の誤投入は, 運転員が投入回数を誤認していると考え, 各誤投入を独立事象とせず, 2回分の誤投入が独立に発生した場合と同様と考え, -4とした。なお, 添加剤誤投入のみによる臨界発生シナリオは, 3日分相当の添加剤が投入用グローブボックスに存在する必要があるが, この可能性は通常の運転からの逸脱の範囲を超えているため, ここでは定量化を行わなかった。

以上の検討結果をもとに, III-4-(1)項で検討した臨界発生シナリオの発生確率を求めた。ここでは, 質量管理と添加剤投入管理の失敗シナリオの発生確率および発生頻度を例に説明する。このシナリオに至るには連続して誤移送が発生するシーケンスが主となる。このシーケンスの発生確率-13と2容器分誤入力する確率-2より, 質量管理失敗確率は-15となる。また, 添加剤の過剰投入確率は, 複数回の誤投入であることから-4である。以上より, 本シナリオの発生確率は-19となった。発生頻度は, 年間の作業日数を保守等の日数を除き200日とし, また1日2回混合作業を行うとして, 年間の作業回数を指数で表現して保守的に+3とすると, $-19+3=-16$ /年程度となった。このように各シーケンスの発生頻度を求めた。その結果, 2バッチ分を誤投入する質量管理の失敗のみで臨界が発生するシナリオが主要なシーケンスとなった。その発生頻度は, $-15+3=-12$ /年である。

富化度 50 wt%のMOX燃料粉末が主工程内受け入れ後, 容量の変化が生じる最終混合槽まで発見されずに搬送

される事象の発生は, 初期混合調整失敗を起こす管理計算機システムによる質量管理の失敗, 混合調整を失敗した容器を複数生産する管理計算機システムの機能喪失, サンプリングによる分析失敗, さらに初期混合調整失敗した複数の容器を1バッチ内で選択する4つの条件が必要である。それらの条件の発生の可能性を考慮すると, 上記事象の可能性は非常に小さいと判断できる。よって, 富化度 50 wt%の場合の物理的な臨界発生の可能性の検討は, 考慮から除くことができる。

以上提案する手順により, 臨界管理パラメータの臨界に対する安全裕度の効果および管理計算機システムの信頼性を定量化した臨界発生頻度評価が可能となり, この値をもとに, 臨界に至るシーケンスの発生の可能性の大小を比較することができた。

IV. ま と め

本報では, MOX燃料加工施設における臨界事象の概略的な発生頻度評価方法の構築を目的に, 富化度, MOX燃料質量, 含水率の3つの臨界管理パラメータに関して臨界計算コードを利用して通常の運転範囲と臨界発生条件との隔たりを定量的に分析し, これをもとに通常の運転状態から逸脱し臨界に至るシナリオを同定し, それをもとに発生頻度を定量化する手順を提案した。

さらに提案した手順を用いてMOX燃料加工施設のモデルプラントを対象に試解析を実施した。解析では, 多くの設備が分析対象となるため, 1つの臨界計算でできるだけ多くの設備でのシナリオ検討が可能となるような計算条件の設定例を示した。

臨界発生頻度の定量化では, 管理計算機システムの信頼性評価が必要であり, そのための概略的な評価手順もあわせて提案した。試解析では, 以下のような本手順の特長を示した。

- 計算機の故障モードとしてプログラム内部の異常や通信時の情報の消失を想定し, 本来とは異なる情報であるにも関わらず, あたかも正常であるように表示する「偽正常」を仮定し, この異常がシステム内に伝播したときの具体的な管理失敗シーケンスを同定できること。
- 計算機の「偽正常」出力に対する機器の動作および運転員の対応を分析することで管理計算機システムの構成要素間の従属性についても検討することができ, また, 構成要素間の従属性を考慮することにより管理計算機システムで想定される機能喪失に至る最短の発生シーケンスの見落としを少なくすることができること。
- 得られた管理計算機システムの機能喪失シーケンスを構成する各要素の失敗確率を指数で与えることで, その発生の可能性の大小を比較できること。

本報で示した臨界発生頻度評価手順は, 重要異常事象を

効率的に選別するための概略的なリスク評価での利用を想定しているため、臨界判定に関わる条件は、様々な設備・機器での臨界の可能性を包括的に判定できるように保守的な仮定を含む条件設定としている。しかしながら、設備・機器の現実の形状で、水没の可能性や周辺に設置される他の機器での中性子反射効果を精度よく考慮した水反射条件で臨界発生条件を求めれば、現実の運転状況に近い詳細な評価が可能となる。このように提案した手順は、手順を変更することなく適切な臨界条件を設定することで必要とする詳細度に応じた、評価を行える利点を有し、適用範囲は広い。

— 参考文献 —

- 1) NISA, *Basic Concept to Apply "Risk Information" to Nuclear Safety Regulation*, May (2005), [in Japanese].
- 2) H. Tamaki, K. Yoshida, N. Watanabe *et al.*, "Development of probabilistic safety assessment method for mixed oxide fuel fabrication facilities," *Trans. At. Energy Soc. Jpn.*, **5**[2], 125–135 (2006), [in Japanese].
- 3) 経済産業省, 日本原燃株式会社再処理施設事業所における核燃料物質の加工の事業申請に係る安全性について, 平成19年6月.
- 4) T. Kimoto, H. Tamaki, K. Yoshida, "Development of methodology for probabilistic safety assessment for MOX fuel fabrication facilities (III) —Preliminary estimation of frequency of criticality events—," *Proc. 2004 Fall Meeting of AESJ*, L35 (2004), [in Japanese].
- 5) Y. Hamaguchi, H. Tamaki, K. Yoshida, "Development of methodology for probabilistic safety assessment applicable to MOX fuel fabrication facilities (IV) —Method for reliability analysis of computerized control systems—," *Proc. 2006 Annu. Meeting of AESJ*, M52 (2006), [in Japanese].
- 6) Working Group on Risk Assessment, *Software-Based System Reliability Technical Note*, NEA/SEN/SIN/WGRISK, Jan. (2007).
- 7) U. S. DOD, *Military Handbook, Reliability Prediction of Electronic Equipment*, MIL-HDBK-217D, Rome Air Development Center, Griffiss AFB, New York (1982).
- 8) H. Langseth, L. Portinale, "Bayesian networks in reliability," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, **92**[1], 92–108 (2007).
- 9) T. Aldemir, D. W. Miller, A. W. Fentiman *et al.*, "Integration of reliability models for nuclear power plant digital instrumentation and control systems into probabilistic risk assessment studies," *Proc. of Int. Topical Meeting on Probabilistic Safety Analysis, PSA'05*, San Francisco, U.S.A., Sep. 11–15, 2005, 1037–1045 (2005).
- 10) U. S. NRC, *Standard Review Plan for the Review of an Application a Mixed Oxide Fuel Fabrication*, NUREG-1718 (1999).
- 11) 日本原子力研究所, 平成15年度 MOX 燃料加工施設安全技術調査等(確率論的安全評価等調査)調査報告書 (2004).
- 12) JAERI, *Nuclear Criticality Safety Handbook Version 2*, JAERI-1340, JAERI (1999), [in Japanese].
- 13) 三菱マテリアル㈱, 再処理施設の MOX 取扱い設備の臨界安全解析, MMC-9103 (1991).
- 14) 日本原子力研究所, 平成15年度 MOX 燃料加工施設安全技術調査等(臨界事故安全評価等調査)調査報告書 (2004).
- 15) 日本原子力研究所, 平成16年度 MOX 燃料加工施設安全技術調査等(臨界事故安全評価等調査)調査報告書 (2005).
- 16) H. Oshima, "Development of microwave heating method for co-conversion of plutonium-uranium nitrate to MOX powder," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **26**, 161 (1989).
- 17) 日本原子力研究所, 平成14年度 MOX 燃料加工施設安全技術調査等(臨界事故安全評価等調査)調査報告書 (2003).
- 18) N. Watanabe, H. Tamaki, *Review and Compilation of Criticality Accidents in Nuclear Fuel Processing Facilities Outside of Japan*, JAERI-Review 2000-006, JAERI (2000), [in Japanese].
- 19) J. F. Briesmeister, Ed, *MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C*, LA-13709 (2000).
- 20) J. Ninagawa, S. Takahashi, Y. Yamamoto *et al.*, "Criticality safety control at plutonium fuel production Facility," *Proc. of the Int. Symp. NUCEF2001*, JAERI-Conf 2002-0004 (2002).