

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 4月3日現在

機関番号：74301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009年度～2012年度

課題番号：21710152

研究課題名（和文） SCMから見たエネルギーシステムの成立性と最適化に関する研究

研究課題名（英文） Study of feasibility and optimization of energy system from a view of SCM

研究代表者

亀井 敬史 (KAMEI TAKASHI)

公益財団法人 応用科学研究所・研究員

研究者番号：80437269

研究成果の概要（和文）：持続可能なエネルギーシステムの成立性を、サプライチェーン・マネージメントの手法を応用した評価法で検証する方法論を確立し、原子力や再生可能エネルギー、電気自動車などのエネルギーシステムに適用した。この結果、持続可能なエネルギーシステムに関わる物質（材料としてのレアアース、廃棄物としてのトリウムおよび使用済み核燃料、燃料としてのトリウム）の物量収支分析から、システムの最適化が可能であることが示された。

研究成果の概要（英文）：A new methodology based on SCM (Supply Chain Management) was developed and applied for feasibility study of sustainable energy system including nuclear power, renewable energy and electric vehicle. It was revealed that this method is available to optimize a system by analyzing materials relating to the system such as rare-earth, thorium and spent nuclear fuel.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	800,000	270,000	1,070,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,300,000	1,020,000	4,320,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システム

キーワード：サプライチェーン・マネージメント、レアアース、トリウム、原子力、電気自動車

1. 研究開始当初の背景

(1) 持続可能性から見た時のエネルギーシステムの評価方法が、二酸化炭素など環境負荷物質の低減の評価軸に偏り、システムそのものの製造や運用の視点から見た成立性を評価する方法論が欠如していた。

(2) その結果、原子力においては廃棄物に位置づけられる使用済み核燃料の滞留として現れる在庫超過の問題、再生可能エネルギーや電気自動車などにおいては製造に用い

られるレアアースの供給不安定性、さらにレアアース製錬時の副産物のトリウムの対策（投棄や在庫超過）などの問題が生じており、これらの解決策が必要であった。

2. 研究の目的

(1) 持続可能性の視点から見た時のエネルギーシステムの評価方法として、システム内における在庫量に注目し、これを最小化することでシステムの特定箇所が破局にいたる

ことを防ぐ方法を、SCM の概念に基づいて構築することを目的とした。

(2) 構築したシステム評価コードにより、持続可能な社会で用いられる複数のエネルギーシステム（原子力、再生可能エネルギー、電気自動車）に関わるマテリアル（使用済み核燃料、レアアース、トリウム）の在庫量を評価対象とし、価格などのパラメータを調整することで在庫の動きをシミュレーションすることでシステムの最適化を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 対象とするエネルギーシステムの選択と、それに関わり、かつボトルネックとなるマテリアルを抽出する。

(2) 対象とするエネルギーシステムを構成する燃料加工や消費、廃棄などのプロセスを抽出し、システムの稼働条件から、システム内で在庫の発生をシミュレーションするコードを作成する。

(3) マテリアルの価格などを調整することで、エネルギーシステム内の在庫の振る舞いをシミュレーションし、過大もしくは過小となることでシステムが破たんするかどうかを評価する。

4. 研究成果

(1) SCM から見た既存の原子力システムの破たん要因：既存の原子力システムは、その運用に置いてはシステムを構成する材料・燃料またそれらの材料から生成される二次部品（圧力容器など）のマテリアルの入出在をサプライチェーンとして抽出する。既存の原子力システムは、高圧の冷却水を格納する圧力容器の供給がボトルネックとなっており、日本製鋼所が供給の80%を占める。これは年間3~4基の供給に過ぎないが、国際エネルギー機関では年間13基程度の純増を想定した規模拡大を見込んでいる（図1）。これは重大事故などによる将来の導入計画の変更が生じる場合などのリスクを見込めば、これ以上の規模拡大は現実的ではない。

一方、装置以外のマテリアルのサプライチェーンを分析すれば、使用済み核燃料の蓄積がシステム内の在庫の滞留・増加を来たらしめており、システムのカタストロフィを起こしうる。使用済み核燃料の主たる阻害要因は核兵器転用が可能となるプルトニウムと、超長期の半減期を持つマイナーアクチニドである。これらを焼却・減容すると同時に、これらの発生量がきわめて少ない核燃料としてトリウムがある。トリウムを既存原子力（ウラン燃料）と併用した場合の使用済み核燃料の削減量を図1に示す。トリウムの利用時にはガンマ線の遮蔽が課題となること、また、大型軽水炉を補完し、圧力容器などのサプラ

イチェーン上のボトルネックを持たない小型原子炉として、ここでは熔融塩炉を想定した。2020年代にトリウムの熔融塩炉が導入されると仮定した場合、使用済み核燃料中のプルトニウムの在庫は数年以内にゼロとなり、ウランを燃料とする軽水炉が併用される場合でも、そこから発生するプルトニウムが在庫として滞留することはなくなる。

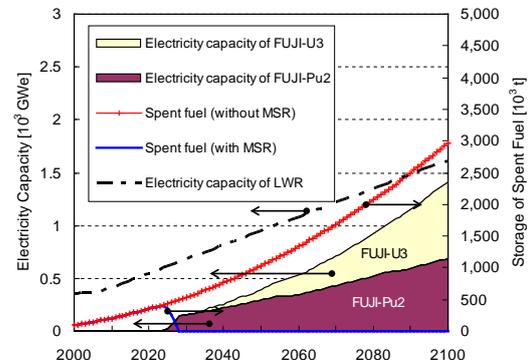


図1 既存原子力の導入予想とトリウム熔融塩炉併用時の使用済み核燃料の在庫推移

(2) SCM から見た時のレアアース供給の課題：風力などの再生可能エネルギーや、電気自動車の導入拡大に伴い、レアアースの生産量が拡大している。1990年代までは米印中が供給していたが、その後、中国が生産シェアを拡大し、現在、97%を占める（図2）。これはレアアースの安価な供給による他国の競争力の低下に加え、レアアース製錬時に発生する放射性物質トリウムによる環境汚染対策の困難さから、中国以外での生産が停止されるに至ったためである。インドでわずかながらレアアースが生産されるのは、インドはトリウムの原子力利用をエネルギー政策としていることからトリウムが主産物であり、レアアースが副産物となっているためである。2010年の中国によるレアアース禁輸に伴う供給危機から、米豪でレアアース生産再開の動きがあるが、コスト負担と社会受容を含むトリウムの対策が進まなければ本格的な生産は継続できない。

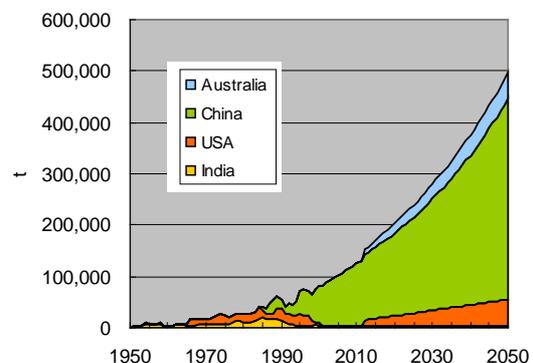


図2 レアアースの国別生産量の推移と予測

(3) レアース生産に伴うトリウムの発生：レアース鉱石は鉱物の種類や産地により、含有率は異なるがトリウムを含む。そのため、レアース鉱物を製錬する際に、副産物としてトリウムが発生する(図3)。インドはモナザイトが主要なレアース鉱物であり、トリウムの含有率が高い。そのため、レアースの生産量は必ずしも多くはないが、累積のトリウム発生量は世界最大で、7万トン以上とみられる。中国のイオン吸着鉱はトリウムの含有率は低く、トリウムのこれまでの蓄積量はインドよりも少ない。しかし、レアースの生産量が今後も年間10万トンを超えれば、蓄積されるトリウムの量は膨大となる。米国もトリウムの含有率は高くはなく、レアース生産量も1万トン程度とみられることから、トリウムの蓄積量は多くない。オーストラリアはモナザイトが主鉱物であり、トリウム含有率が高い。そのため、レアース生産量が少なくともトリウム蓄積量は多くなる。

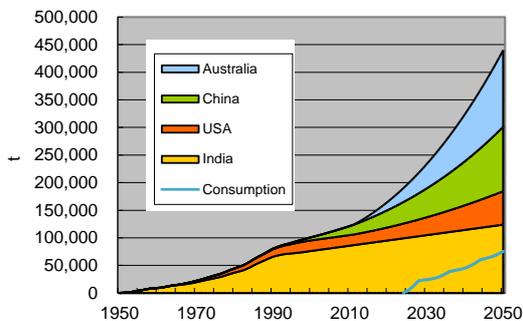


図3 トリウム蓄積量の国別推移と予想

(4) トリウムの利用方法の検討と評価：トリウムの継続的な蓄積はレアース供給システムのカタストロフィを意味するため、この在庫を低減する方法として、トリウム利用技術について検討を進めた。これまでに提案されている溶融塩炉は、炉外で放出されるガンマ線によるメンテナンス等の運用の困難さ、熱交換器の細管における材料腐食の可能性から、実現可能性に乏しいと評価されてきた。このため、出力を1000キロワットと小型化し、熱交換器と炉容器とを一体とし、炉容器表面からの放熱による伝熱機構を採用した溶融塩炉を開発した(図4)。これにより、前述した2020年代以降のトリウム利用が想定可能と考えられる。この場合においても、燃料としてのトリウムの利用量は、併用する核分裂性物質のプルトニウムの供給量によって制約されるため、2020年代以降の実装量は図1に示す量にとどまり、これによるトリウムの消費量も図3に示す値にとどまる。結果として、発生量との差分のトリウムは在庫として蓄積されることとなる。

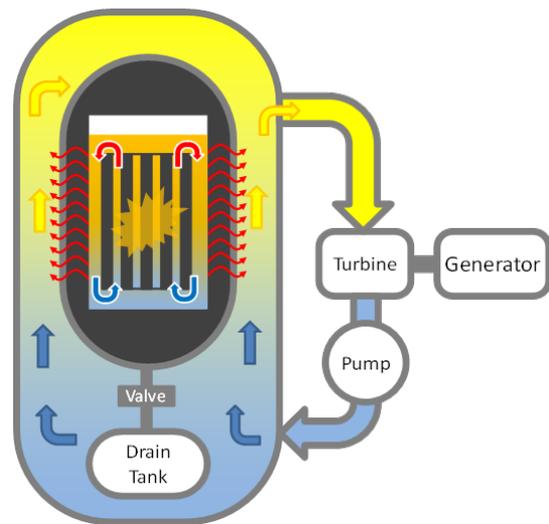


図4 炉容器表面放熱型トリウム溶融塩炉

(5) トリウムの保管枠組み：トリウムの発生がレアース生産の可否を左右する理由は、トリウムが現時点では利用価値がないためである。一方で環境中に廃棄された場合に放射能汚染を引き起こすため、その発生を抑制する、すなわち、生成原因となるレアースの生産そのものを停止させることとなる。これとは別に、トリウムの核燃料としての利用の可能性はあり、ウランに対してメリット(プルトニウムとマイナーアクチニドの生産量が少ない)もある。しかしながらトリウムは核分裂性同位体がないために、プルトニウムなどを別途供給する必要がある。原子力を初めて行う国は、プルトニウムの在庫はないため、トリウムのみで原子力を利用し始めることはできない。そのため、トリウムの利用への期待がありながらも、トリウムを安易に保管することの抵抗の要因となっている。かつ、これらトリウムの発生国、潜在的利用国、プルトニウム発生国がそれぞれ異なる事情がある。そのため、時間軸として最重要となるレアースの供給とトリウムによる環境汚染の防止を最優先に捉え、トリウムを国際的に保管する枠組みとしての「トリウム銀行(The Bank)」を提案した(図5)。

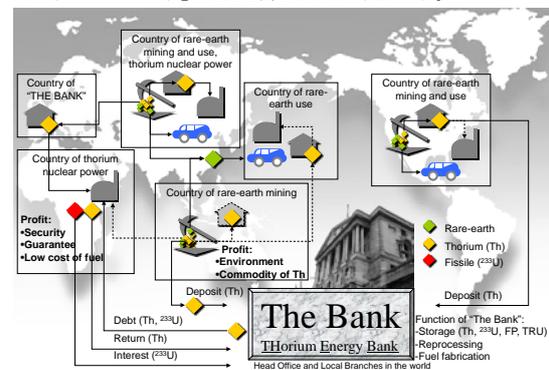


図5 「トリウム銀行(The Bank)」の概念

(6) レアアース製錬に伴うトリウム対処費用回収メカニズムの構築：「トリウム銀行 (The Bank)」を実効的に稼働させるに際して重要となるのは、その運用資金をどのように確保するかである。本来、トリウムは主目的として発生させられているのではなく、レアアースの生産に伴う副産物として発生している。このため、国際的な枠組みでトリウムを保管するに当たっては、レアアース消費者から、トリウム対策 (分離・保管) の費用を回収することが望ましい。そのメカニズムとして「レアアース輸出国機構 (Organization of Rare-Earth Exportation Countries: OREEC)」を考案した。ここでは、OREEC に加盟するレアアース生産国がレアアースを輸出する際に、本来のレアアース生産コストに基づいて決められるレアアース価格に対して、OREEC 内で一律に与えられる付加的な費用 (ThAX と命名) をあわせて売価とし、その入金時に ThAX 分を OREEC に収める。レアアースの輸入者はこれを販売する際に ThAX 分を上乗せして売価とすることができる。これを繰り返すことにより、レアアース関連商品 (ハイブリッド車など) の購入者が、ThAX を支払うこととなる (図 6)。OREEC 加盟国は、ThAX を用いてレアアース製錬時のトリウムの分離と保管を適切に行うことができ、この対策を取った場合に、レアアース販売時に、環境汚染対策を行っていることを保証される。これにより、トリウム対策費用をレアアース生産のコストと分離し、レアアース生産を純粋に市場原理に基づいた競争の元で行う枠組みを提供する。

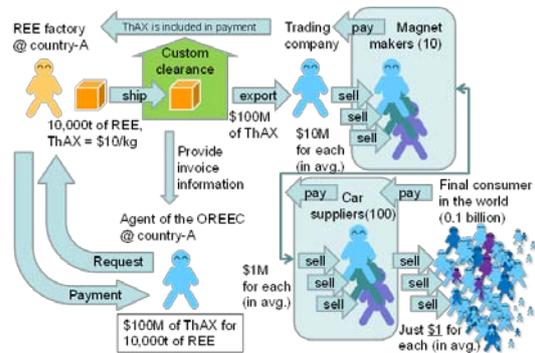


図 6 レアアース輸出国機構によるトリウム対策費用の回収メカニズム

本研究は、これまで個別に検討されてきた資源開発としてのレアアースの生産と、エネルギー技術開発としてのトリウム利用を機能的に連動させるとともに、適切なコスト負担を伴う枠組みを国際的な基盤に基づいて構築しており、国内のみならず、海外においても高く評価されている。国内においては、種々のメディアで連日報道され、海外においても同様である。今後、本研究の提案が具体化され、持続可能な社会の構築が進められて

いくと考えられる。本研究については、カザフスタンから招待され、2012年10月に一か月同国に滞在し、講義を行った。その内容は同国の新聞に掲載され、中核となるトリウム溶融塩炉は、「Future Energy」をテーマとする2017年のアスタナ万博での展示が検討されている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ① Takashi Kamei, Preliminary Study of Development of the Organization of Rare-Earth Exportation Countries (OREEC), Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 有, Vol.1, No.1, 2013, pp.1-13
- ② Takashi Kamei, Study of functions of "The Bank (Thorium Energy Bank)", Nuclear Safety and Simulation, 有, Vol.4, No.1, 2013, pp.67-71

[学会発表] (計9件)

- ① Takashi Kamei, Thorium MSR As A Small-Scale Energy Source - Opportunities For Japan, ASME 2011 Small Modular Reactors Symposium, 2011年9月29日, アメリカ・ワシントン
- ② Takashi Kamei, Implementation Strategy Of Thorium Fuel Cycle, PHYSOR2010, 2010年5月11日, アメリカ・ピッツバーグ
- ③ Takashi Kamei, A Technical Approach To The Low Carbon Society Based On The New Nuclear Power Utilizing Thorium, 5th Dubrovnik Conference On Sustainable Development Of Energy Water And Environment Systems, 2009年10月1日, Dubrovnik, Croatia

[図書] (計5件)

- ① 西川 有司, 藤田 豊久, 亀井 敬史, 中村 繁夫, 金田 博彰, 美濃輪 武久, 藤田 和男, 日刊工業新聞社、トコトンやさしいレアアースの本 (今日からモノ知りシリーズ)、2012年、160ページ
- ② 高見善雄/亀井敬史/西川有司, 雅粒社、トリウム溶融塩炉で野菜工場をつくる北海道中川町の未来プロジェクト、2012年、102ページ
- ③ 亀井敬史, 雅粒社、平和のエネルギー トリウム原子力Ⅱ 世界は“トリウム”とどう付き合っているか?、2011年、111ページ

- ④ 亀井敬史、雅粒社、平和のエネルギー トリウム原子力 ガンダムは“トリウム”の夢を見るか?、2010年、86ページ
- ⑤ 亀井敬史、財団法人国際高等研究所、核なき世界を生きる～トリウム原子力と国際社会～、2010年、114ページ

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

- ① 日経産業新聞、2009年6月4日、先端技術欄
- ② 日本経済新聞、2011年1月26日、フォーカス欄
- ③ 電気新聞、2011年2月10日、ひと読者
- ④ 読売テレビ、2011年6月12日、たかじんのそこまで言って委員会
- ⑤ Kazakhstan Pravda、2013年1月5日、Society欄
- ⑥ The National (UAE)、2013年2月1日、Industry Insights欄

6. 研究組織

(1) 研究代表者

亀井 敬史 (KAMEI TAKASHI)
公益財団法人 応用科学研究所・研究員
研究者番号：80437269

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：