

名古屋大学工学研究科 総合エネルギー工学専攻  
エネルギー・システム工学講座

## エネルギー資源循環工学研究グループ

榎田洋一(教授), 澤田佳代(准教授)

非常勤研究員 1 名, 博士前期課程 1 名, 学部学生 3 名, 学部研究生(留学生) 1 名

---

### 研究分野と研究方針

#### 【概要】

原子力エネルギー利用のような大規模集中型から移動体のような小規模分散型までの様々なエネルギー利用形態におけるエネルギー資源とその利用に伴って発生する廃棄物の処理, 処分および資源循環, すなわち, 廃棄物管理についてプロセス・システム工学的観点から研究と教育を行っている。

特に, 原子力エネルギー利用に関しては, 利用に伴って発生する高レベル放射性廃棄物である使用済原子力燃料の処理, 処分および資源循環について, 現行の世界標準技術である PUREX 法再処理, ホウケイ酸ガラス固化および地層処分に係る先進技術の開発, 実証, 安全研究に加えて, 将来の原子力エネルギー・システムに整合する長期的に合理的な処理, 処分, 資源循環システムの開発, 実証, 安全研究にも取り組み始めている。すなわち, 喫緊の取り残された技術課題の解決に取り組むとともに, 将来システムの研究と教育を行うことが我々の研究グループの方針である。

また, 自動車排気ガス浄化触媒に関して, 含まれている白金族元素が世界的に極めて希少な資源であることに鑑み, 資源循環の観点から省エネルギー性と省資源性に優れた資源循環プロセスの原理実証研究に注力している。

#### 【キーワード】

原子力エネルギー・システム, プロセス・システム工学, エネルギー廃棄物管理, 省エネルギー, 省資源, 資源循環の経済的合理性, 白金族元素, エネルギー資源循環, 放射性廃棄物処理, 放射性廃棄物処分, 希少金属の資源循環, ガラス固化, ホウケイ酸ガラス, 鉛ガラス, 廃棄物・廃棄体直接転換, PUREX 法, 液液抽出, 超臨界流体抽出。

#### 【主な研究と内容】

##### (A) 高レベル放射性廃液のガラス固化

原子力燃料の資源循環に伴って発生する高レベル放射性廃液の安全は, まず, 放射性物質が漏洩しがたい固体として廃棄体がパッケージ化されることにより確保される。媒体は例外なくガラスが選定されるが, ガラスの安全な製造が現在の成熟した工業技術で十分可能であること, 製造するガラスが多少の組成変動に対してロバストであること, 製造したガラスが長期間安定であり, 特に耐水性も高いこと, がその理由である。しかし, 最近の技術経験によって, 本格的な製造の

前にガラス固化体とその製造方法にかかる改善すべき点とも明らかになってきており、エネルギー工学分野における喫緊の取り残された技術課題の一つとしての位置づけから、その本質的解決方法の提示、解決方法の学術的裏付け、工業的製造方法への反映についての研究に取り組んでいる。

#### (B) 多様な原子力エネルギー・システムに対応するバックエンド研究

将来の日本における原子力エネルギー利用の姿は、これまでの利用体系だけに拘泥することなく、安全に富んだ多様なエネルギー源として期待されている。原子力エネルギー利用に伴う資源循環と廃棄物処理・処分、すなわちバックエンドについても安全、経済的合理性、社会的受容性のすべてを満足することが求められており、新規で多様な原子力エネルギー利用体系におけるバックエンドについて、既存技術では対応できない形態の放射性廃棄物に対応する管理技術について研究テーマとして取り組んでいる。さらに新規で多様な利用体系に応じて開発された管理技術自体を中心として、既存技術の延長に決別した経済的合理性、社会的受容性に富んだ新しい時代に整合する管理体系の技術提案にも取り組んでいる。

#### (C) マルチスケール液液抽出システムの開発

原子力燃料の資源循環のためには、大規模な液液抽出法が工業的に用いられている。この技術は80年の歴史を有する成熟した技術であり、他の沈殿法やイオン交換法等の技術で代えがたい経済的合理性と廃棄物管理上の優位性を有している。一方で、液液抽出の最近の学術的発展は、高機能な新規抽出溶媒の開発研究に特化しているが、新規溶媒の採用は安全性や経済的合理性に不安がある。このため、新規溶媒に代えてナノメートル～マイクロメートル～ミリメートルの各スケールにおける物質移動現象を機能的に調整して組み合わせるマルチスケール液液抽出システムの開発研究に取り組んでいる。この手法は、実績ある既存の抽出溶媒を利用して安全性と経済的合理性を確保しながら、物質移動や溶解・抽出反応を最も適切なスケールで最適化して集中的に生起することで総合的な性能を確保する手法であり、物理的な液滴形成方法と組み合わせる研究を行っている。

#### (D) PUREX 液液抽出システムのプロセス・システム解析

現行の使用済み原子力燃料の資源循環は、第2次世界大戦直後に技術開発が行われた再処理方法が使用されており、その中心プロセスは、PUREX 液液抽出システムである。この液液抽出プロセスのプロセス・システム解析について、名古屋大学で開発した計算モデルを含む3種類のモデルを用いて、中性子臨界安全性や核不拡散性の観点からプルトニウム製品濃度のプロセス制御方法についてシミュレーション解析を行い、プロセス制御手法や最適化手法の開発を目指している。

## 平成30年度の研究・教育の概要

### 【高レベル放射性廃液のガラス固化】

現行のホウケイ酸ガラス固化体製造プロセスで懸案となっている導電性酸化ルテニウム針状結晶の耐水性に与える影響について、試験片の製造と浸出試験前後での走査型電子顕微鏡による観察を行った。耐水性に係る実験成果や結論が得られるまでに研究は進展しなかったものの、平成

29年度に成功したネフェリン結晶がホウケイ酸ガラス中に形成された場合の耐水性評価のために開発した評価手法がネフェリン以外の異相の存在の影響についても適用可能であることを明らかにできた。

#### 【多様な原子力エネルギー・システムに対応するバックエンド研究】

ホウケイ酸ガラスを媒体とする高レベル放射性廃棄物のガラス固化方法に代えて、鉛ガラスを媒体として高レベル放射性廃液を固定化する方法、さらには、使用済み原子力燃料そのものを硝酸で溶解することなく、直接、固化する方法の原理実証を複数の基本段階に分解して行った。この方法では、第一段階として酸化鉛を還元剤として作用させて、将来燃料の減速材・被覆材である黒鉛や燃料構成要素の金属を酸化して鉛ガラスに含有させる。この段階の原理実証については、黒鉛とステンレス鋼を用いて、これらに含まれる元素を鉛ガラス固化プロセスのオフガスシステムに移行できること、または、鉛ガラスに均一に固定化できることを実験的に確認できた。次に、製造した鉛ガラス固化体の地下水に対する耐水性を格段に向上するため、二酸化ケイ素を鉛ガラスに混合してガラス固化する方法を提案して実験で検証し、重量百分率で10%以上の二酸化ケイ素を混合することで、耐水性の大幅な向上が実現でき、実際の試作品はホウケイ酸ガラスよりも耐水性が向上できることを確認した。これにより酸化鉛を還元剤とし、鉛ホウケイ酸ガラスを固化媒体とする新規で多様な原子力エネルギー・システムに対応可能な高レベル放射性廃棄物処理方法の原理実証に成功したといえる。

さらに、ウランやプルトニウム等の核分裂性物質および核分裂親物質が資源として必要になるまでの比較的長期に鉛ガラス固化廃棄体パッケージとして地層処分場に暫定保管し、その後、必要に応じて再取り出しするバックエンド体系について、12月に日本原子力学会中部支部で日本語にて、3月に米国廃棄物管理学会にて英語にて発表し名古屋大学から国内外に先駆けての情報発信を行った。

#### 【マルチスケール液液抽出システムの開発】

ファインバブルの発生とその利用に係る工業技術は、日本の戦略技術一つとして位置づけられており、既に様々な産業分野に応用されている。しかし、液液抽出分野での利用例は殆どない。この理由は、液滴の微粒化の実現は容易であるが、その後の合一が難しいためである。この矛盾の解決については、平成29年度までの研究で、抽出溶媒の希釈剤を機能的に微細液滴の吸収剤として活用することで技術的に解決しているため、平成30年度の研究では、放射性物質を含む金属酸化物による表面汚染を除染する目的に応用するため、市販のファインバブル発生装置を転用することで発生させた、硝酸とリン酸トリブチルのマイクロエマルジョンの微細な液滴を、酸化ネオジムに作用させて溶解抽出することによる除染模擬実験に成功した。また、酸化プルトニウムによる表面汚染の除染を模擬する酸化セリウムの溶解抽出について、廃棄物管理上、易分解性の過酸化水素水やオゾン水を活用するセリウムの酸化・還元を有機的に組み合わせることによって実現することに成功し、難除染性酸化プルトニウムの新規除染方法に道を拓くことができた。

#### 【PUREX 液液抽出システムのプロセス・システム解析】

PUREX 液液抽出システムは、第2次世界大戦後の東西冷戦時代に基盤が開発され、機微技術ながらも、世界標準技術として現在も発展して使用されているものである。PUREX 液液抽出システ

ムにおける最大プルトニウム濃度のプロセス内変動は、燃料溶解液の給液組成や流量率の変動、供給硝酸濃度の変動を起因事象としてもたらされ、最大濃度の発生する時間と場所は、起因事象の変動量に加えて、プロセスの標準設定条件にも左右される複雑で動的な現象である。プルトニウムを使用する必要があるため、臨界の危険性もあるために、実験による網羅的な研究は不可能であるため数理モデルに基づくプロセス・システム工学的観点からの計算解析が必要であり、その準備として、数理モデルの整備と数理的な最大化問題としての理論的考察を行った。この結果、プロセスの過渡応答の中で、時間に依存して表れるプロセス内の不特定位置で出現するプルトニウム最大濃度は、プロセスの定常状態の最大濃度と一致することが演繹された。さらに、米国で開発された数値シミュレーションモデル SEPHIS を用いた計算解析では、解析例の範囲でこの演繹結果を裏付けており、動的な最大値問題としての解析上、重要な知見を得ることができた。

#### 【本年度の研究成果発表の概要】

	国内会議発表	国際会議発表	国際会議予稿	学術論文
教員	0	3	3	1
学生	2	0	0	0

## 本年度の卒業論文・修士論文・博士論文のタイトル

#### 【卒業論文】

- ・ ホウケイ酸ガラス中の二酸化ルテニウム結晶生成が耐水性に与える影響
- ・ 鉛ホウ酸ガラスを用いた金属アルミニウムを含む放射性廃棄物の廃棄体化
- ・ 鉛ホウ酸ガラスの分相を利用する資源回収システムの研究

#### 【修士論文】

- ・ 硝酸と有機溶媒から成るエマルジョンを用いた希土類酸化物の溶解抽出

## その他・特記事項

- ・ 榎田洋一，2018年度 日本原子力学会中部支部原子力エネルギー・システム研究委員会主査
- ・ 榎田洋一，2018年 米国 Albert Nelson Marquis Lifetime Achievement Award
- ・ 榎田洋一，2018年度日本原子力学会理事
- ・ 榎田洋一，2019年1月選出 日本原子力学会フェロー，