

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

応用同位体科学研究グループ

杉山貴彦（准教授）

博士後期課程 1 名（社会人選抜），博士前期課程 6 名，学部 2 名（2023 年度の実績）

研究分野と研究方針

【概要】

研究室名が表わすように，同位体にかかわる科学と工学に広く興味をもって研究を展開してゆくことを目標としている。「応用」と冠している理由は，純粋な学問にとどまるのではなく，実用的な研究を志向しているためである。研究テーマは，社会の需要，動向を観察して幅広く抽出・選定する方針である。

核エネルギーの利用は，昨今の環境問題やエネルギー需給の観点から，人類の持続的発展に欠かせないものと考えている。核エネルギーの利用においては，同位体にかかわる科学と工学は切り離せないものであり，したがって，エネルギー理工学科で研究を行う必然性があると考え。具体的には，原子力の安全利用・後処理や未来エネルギーに位置づけられる核融合に関する研究を行う。

エネルギー応用以外にも，例えば，高度医療や分析科学，宇宙物理など様々な分野で，同位体の新奇応用が始まっている。しかしながら，利用されている同位体種の種類や量は，必ずしも多いとは言えず，未開発の領域が広く残されている。異分野連携を強く意識して，同位体応用の研究を行う。同位体調整材料は，現在，非常に高価で少量であるから，これをより安価に多量に生産することができれば，多くの分野に与える影響は大きく，同位体応用の分野の創出・拡大に資することができる考える。

【キーワード】

同位体，同位体科学，化学工学，移動現象論，同位体分離，原子力工学，核融合炉工学，蒸留法，化学交換法，吸着法，トリチウム，重水素，リチウム，窒素，ホウ素

【主な研究と内容】

(A) 水素同位体に関わる研究

重水素とトリチウムは，最も軽い同位体で，原子力利用や核融合炉開発に関わりが深い．特に，多量の水素同位体を燃料として利用する核融合炉では，水素同位体の分離・純化，組成調整，水素同位体からの不純物の除去，放射性同位体であるトリチウムの安全取り扱いと環境漏洩防止など多くの技術が必要である．新規技術の研究開発と既存技術の高度化により，課題の解決に取り組む．特に，水蒸留法，水-水素化学交換法による同位体分離，水素-水間での同位体交換反応について長年にわたって取り組んでおり，これらを基盤として，気体および液体の水素同位体の取り扱い技術の研究開発を行う．

(B) 福島第一原子力発電所の汚染水処理に関する研究

事故後しばらくは，汚染水からのトリチウムの除去について，水素同位体分離研究の経験をもとに技術的可能性を検討した．トリチウム水タスクフォースによる検討の結果，2016年6月の報告書にまとめられているように，トリチウムは汚染水から除去するのではなく，環境放出することが望ましいとされた．その後，汚染水の海洋放出が令和3年4月に閣議決定され，放出に当たってはトリチウム濃度を国の基準の40分の1とすることとなった．

一方，汚染水の処理は長期化を余儀なくされており，トリチウム以外の放射性核種について，二次廃棄物低減の観点からも吸着除去の高性能化，処理運転の効率化が課題となっている．汚染水には，放射性核種の他にも，放射性核種の吸着に影響する様々な元素が含まれており，吸着塔の性能予測を困難にしている．そこで，使用される吸着剤の性能評価を行うとともに，多成分系平衡吸着モデルの構築，吸着塔内物質移動シミュレーションコードの開発を行い，処理液の組成や液性に応じて吸着塔の性能予測を精度良く可能とするための研究を行っている．

(C) 吸着法による同位体調整材料の製造に関する研究

吸着法の一つである置換クロマトグラフィー法は，分離目的の元素を液体の化学形で取り扱うため密度が高く，同位体分離においても，大量製造に適用できる可能性が高い．置換クロマトグラフィー法を同位体分離に適用する際の問題点は，単位分離の性能が小さく，必要な吸着塔が長大になることであり，これを解決すべく，新規吸着剤の開発，分離性能評価手法の開発，新規運

転方法の開発を行っている。Li-6, 7, N-15, Si-29 などを分離対象として研究を行っているが、同位体調整材料の需要に対して汎用的に対応できる技術の開発を目標としている。

(D) 重水素の国産化に資する研究

重水素は、輸出規制物質であり自主生産の敷居は高く、我が国ではほぼ全量を米国からの輸入に頼っている。D-T 核融合発電では、重水素を燃料としてワンスルーで消費するため、膨大な需要が生じるので、資源小国の我が国では、これを他国に頼るのではなく自主生産することが考えられる。また、重水素は、半導体や光ファイバーの製造工程、プロトン NMR 等の分析において使用されており、さらには、製薬の分野でも活用が進んでいる。したがって、現在は 5 億円程度の市場規模であるが、将来的な需要は高まってきている。国内では、ガス関連メーカーが商業生産に向け研究を進めているが、コスト削減や大量生産が未だ難しい状況である。したがって、原料を水とすることは大きな魅力があり、その研究開発に取り組んでいる。

2023 年度の研究・教育の概要

【原子力水素製造に係る水素同位体分離に関する研究】

水素は、化学反応の中では大きなエネルギーを発して燃焼し、その後は無害な水となるのであって、一次エネルギーではないものの多くの利点があることから、環境調和型エネルギー社会に向けて注目されている。二酸化炭素排出量がほとんど無い原子力によって、水から水素を製造することは一つの魅力ある選択肢であって、高温ガス炉と熱化学反応を組み合わせた原子力水素製造の研究開発が進められているところである。一方で、広く普及した軽水炉において、通常運転によっても少なくない量の水素が発生しており、その利用を検討することは価値がある。

軽水炉において発生する水素には、放射性同位体であるトリチウムが含まれている。このトリチウム濃度は、もちろん条件にもよるが、約 1.6×10^{-2} Bq/cm³ と見積もられており、法令の排出基準濃度の 70 Bq/cm³ にくらべれば十分に薄く、天然大気中の水素の放射能濃度 1.0×10^{-8} Bq/cm³ に比べれば濃い。そのため、水素の用途によっては、除染を検討する必要がある。以上の背景から、軽水炉施設から発生する水素の有効利用に関連して、特に同位体分離・濃縮に着目して、具体的には、水 - 水素化学交換法の技術成熟と性能向上を目指し、①疎水性白金触媒の調製と②反応塔の軸方向混合の評価を行い、実用化を目指した研究開発を進めた。調製した触媒を充填した有効充填長 40 cm の反応塔を用いて、約 20 万 Bq/cc のトリチウム水を原料としてトリチ

ウム除去実験を行い、全分離係数として約 680 倍を得た。これは有効充填長 1 m に換算すると約 1400 万倍となり、これまでの性能を大幅に更新した。また、重水素を考慮した水素同位体 3 成分系の 2 相間平衡について、組成に依存しない普遍的なモデルを提案し、その妥当性の一部を実験データとの比較により実証した。

【多成分吸着現象に関する研究】

福島第一原子力発電所の汚染水処理に関連して、多核種除去設備に用いられる吸着塔の性能予測に資する研究を行った。本研究の一部は、日立製作所との共同研究として 2017 年度より継続して実施している。多成分吸着現象のシミュレーションに必要となる基礎式の整理と計算コードの作成を行った。特に、イオン価数の異なる成分を含む汎用的な吸着平衡計算を可能とし、吸着カラムの物質移動シミュレーションコードに組み込むことを目標とした。吸着平衡モデルに関しては、実現象に合致し、かつ理論的に多成分系に拡張可能なイオン交換型の平衡式とした。バッチ吸着実験の結果を、作成した計算コードにより評価したところ、ストロンチウムやセシウムなどの主要注目核種の吸着に対して、プロトンの競合吸着が無視できないことが明らかになり、プロトンを含めた多成分系の吸着現象を表現する化学工学的モデルの構築を進めた。さらに、吸着剤の構成元素であるケイ素が溶出することにより、ケイ酸が生じ、その電離平衡が吸着平衡に影響を及ぼすことがわかり、実験データの取得とモデルの構築を行った。

【ブランケット用高濃縮リチウム 6 生産のための分取クロマトグラフィーシステムの開発】

2019 年度より科研費を受け、題記の研究を行っている。核融合ブランケット材である高濃縮リチウム 6 の生産に適した高性能吸着材を新規に開発する。この吸着材を充填したカラムは、必要なカラムの長さが従来に比べて 3~4 桁と大幅に小さくなることが予想され、物質移動の律速段階が粒内拡散から軸方向分散に変わる。これにより、運転条件の最適化と合わせて、これまでになく高い生産性を実現し得る。単なる高性能吸着材の作製にとどまらず、同位体材料の大量製造方法としてスケールアップ可能な、分取クロマトグラフィーシステムを開発する。新規開発する吸着剤を用いたクロマトグラフィーシステムの評価に適用可能な計算コードの作成と、その計算コードを用いて代表的な運転条件について検討し、今後行う同位体分離実験の指針とした。樹脂合成と吸着材の調製については、水分が含まれると爆発性の化合物を生じる可能性があることが判明したため、不活性ガス雰囲気グローブボックスシステムの供給ガスを窒素ガスから乾燥圧縮空気に変更した。圧縮空気の乾燥は、コンプレッサー後段のアフタークーラーに加え、水分膜分離モジュールを設置して、露点 -60℃以下を可能とした。これら設備を活用して、新奇吸着剤の合

成に取り組み、約 1.5 g を得た。さらに、この吸着剤を充填したカラムを作製した。また、科学研究費補助金により整備した液体クロマトグラフィー試験装置を用いて、溶媒と溶質、対陰イオンの異なる様々な組み合わせに関してクロマトグラフィー実験を行い、データを蓄積した。

ブランケット用リチウム 6 の生産には、多数の分離要素を組み合わせたカスケードの利用が不可欠であることから、カスケード性能に関して数値シミュレーションに取り組んだ。具体的には、分離要素の故障や性能低下などの不具合が、カスケード全体に及ぼす影響を定量的に評価する手法の開発した。この計算モデルおよび計算コードによって、分離要素の総数に対して不具合数をどこまで許容できるかを評価したり、実用的なカスケードの設計における裕度を評価したりすることができる。

【重水素の国産化に資する研究】

水を原料とした重水の国産化を目的に、水蒸留法および水 - 水素化学交換法による重水濃縮の基礎研究を行った。水蒸留については、反応塔の内径 1.6 cm、有効充填長 2 m の減圧水蒸留実験装置を再整備し、予備実験を実施してその健全性を確認した。また、重水濃度の測定手法として、安定同位体比質量分析計および密度比重計を整備し、分析方法を確認した。水 - 水素化学交換法については、装置の一部として用いる電気分解槽の電気分解における同位体効果を確認するため、約 50 % の重水に 20 万 Bq/cc のトリチウム水を 3 cc ほど添加した水素同位体 3 成分系の試料を調製し、その電気分解実験を行った。同位体組成の分析手法に習熟するとともに、2 成分系の平衡定数を用いて 3 成分系の平衡組成を予測するモデルを構築した。

重水素製造の実用化のためには、大流量処理に関する開発が不可欠であり、規則充填物を用いた充填塔を利用することが効率的である。したがって、規則充填物としてズルツァーパッキングを採用し、内径 5 cm、有効充填長 1.2 m の減圧水蒸留実験装置を構築し、20 % 程度の重水を試料水として減圧水蒸留実験を行った。分離係数として最大 3 程度を達成し、実験装置およびその操作に関して妥当性を確かめた。

【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	1	0	1
学生	6	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】

- ズルツァーパッキング充填塔を用いた減圧水蒸留法による軽水素と重水素の同位体分離
- リチウム同位体分離カスケードにおける各分離要素の故障がカスケード全体の性能に与える影響

【修士論文】

- 核融合ブランケット用リチウム6製造への擬似移動層プロセスの適用
- 水素3成分系の同位体分離に用いる水-水素化学交換塔の分離性能評価手法の開発
- 福島第一原子力発電所の汚染水処理における多成分吸着現象の解析に向けたイオン交換型吸着平衡モデルの開発

その他・特記事項

【受賞】

- 日本原子力学会中部支部奨励賞, 佐藤彰真, 規則充填塔を用いた減圧水蒸留法による軽水素と重水素の同位体分離, 2023年12月15日