

化学反応を生かした 原子力エネルギーの利活用

原子炉工学研究所

加藤 之貴 准教授
(H3博化工)



原子炉工学研究所に奉職し19年を迎えた折にこの執筆の機会を頂いた。ここでは自身と原子力の関わり、そしてこれを背景とする研究室活動に言及する。

10⁶倍ショック

本学理工学研究科化学工学専攻 神沢淳先生の下で、1991年学位を得て、原子炉工学研究所（原子炉研）の助手職を頂いた。期せずして原子力に関わる機会を得たことは大きな転機であった。

学生時代は有機系ケミカルヒートポンプを用いた100℃以下の低質な廃熱エネルギーの回収・利用に関わってきた。原子炉研に奉職し、それまで関わってきた化学エネルギーに対して、原子力エネルギーの余りにも大きいエネルギー密度に圧倒された。標準的な化学エネルギー物質として石炭は約29 kJ/g- coalの燃焼エンタルピー変化を有する、これに対しウラン235 (²³⁵U)の核分裂エネルギーは82 GJ/g-Uであり石炭の10⁶倍のエネルギー密度である。判っていたつもりでもあまりの大きさに改めて驚いた。廃棄物の量も同様であり、炭素エネルギーの廃棄物である二酸化炭素の排出量

は、日本国内で年一人あたり9 ton/年である、一方、原子炉燃料の使用済み濃縮ウランの年一人当たりの排出量は63 g/年であり、物質量は(1.4 × 10⁵)分の1と圧倒的に小さい。放射性廃棄物のリスクは認識しなければならないが、一方で原子力エネルギーのポテンシャルを工学的に正しくとらえることの重要性を感じた。また、時代の気分として原子炉に関してネガティブなイメージが先行し、核エネルギーの平和利用における化学工学の貢献性は、案外と忘れられていた。化学工学の生かせる場として、大きな可能性を感じた。そこで自身が化学工学で学んだ化学反応の工業利用技術による原子力エネルギーの利活用を研究の主目的においた。

日本の将来のエネルギー供給

現在、原子力の社会貢献は軽水炉型原子炉などによる発電であり、日本の発電量の3割以上を賄っている。日本の総一次エネルギー消費量は730 GWであり、その内、原子力エネルギーは10%、化石燃料が86%である。一方、一次エネルギーの利用先は36%が発電向けであり、55%は熱利用向けである。日本の将来のエネルギー供給において、二酸化炭素排出削減のた

めには再生可能エネルギーによる GW 級の可能性を期待したいが、実質的な同級の対応を考えると原子力を排除することは困難である。従来、原子力は上記のように発電分野に特化して利用されてきたが、今後の二酸化炭素削減には発電以外の熱供給分野での利用が重要になる。よって、原子力の発電以外の利用が必要であり、それに伴う新たな技術が必要となる。

とくに原子力の高密度エネルギーを小口に分配し利用側に使いやすくする技術が必要である。そこで、このエネルギー貯蔵・変換分野での化学反応のあらたな活用を模索してきた。本研究室はこのような背景から原子力エネルギーの発電以外の目的のためのエネルギー利用システムの提案、要素技術開発を行い、それらを持って二酸化炭素排出削減に貢献したいと考えている。以下では中温向けケミカルヒートポンプ、炭素循環システムを紹介する。

ケミカルヒートポンプの 中温熱への適応可能性

ケミカルヒートポンプは化学反応を利用した蓄熱が可能であり、従来事例の少ない中温 (100 ~ 300℃) さらに高温 (300℃ ~ 1000℃程度) の蓄熱が可能である (ここでの中温、高温の定義は著者によるもの)。中温域は原子炉のみならず、高温プロセスから未利用エネルギーとして大量に排出されており、最近その活用に関心が集まりつつある。中温域で駆動するケミカルヒートポンプを高温プロセスへハイブリッド (複合) 化することを検討している。

京都議定書を契機に、熱エネルギープロセス

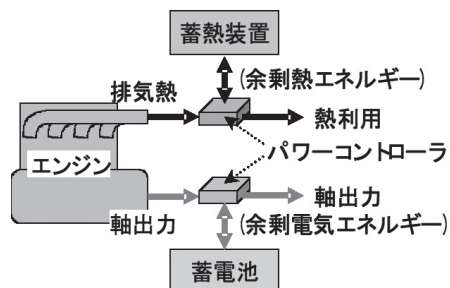


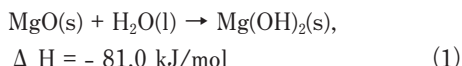
図1 サーマルハイブリッドエネルギーシステム概念のエンジンへの適用例

における熱利用の高度化は化石資源保護、二酸化炭素 (CO₂) 排出抑制の観点から再びわが国の重要なテーマとなっている。近年、余剰駆動力をバッテリーに電力貯蔵するハイブリッド自動車が市場に登場し大きな省エネルギー効果を実証している。スマートグリッドも電力貯蔵技術の活用でエネルギー利用の高効率化を進めている。この手法を熱に適用し、余剰熱を蓄熱する機能をハイブリッド化し、原子力オフピークエネルギー、エンジンをはじめ高温プロセスの定常操作性を高めシステムの高効率化を目指すことを提案している。図1にエンジンを対象にサーマルハイブリッドシステムの構成を電力貯蔵ハイブリッドシステムと比較して示す。電力貯蔵ハイブリッドではエンジンと軸出力との間に蓄電池による電力としての動力貯蔵機能が組み込まれ、パワーコントローラで電力の出入力制御を行う。制動回生エネルギー、またはエンジンからの発電出力を貯蔵し、駆動側の需要に応じて電力を駆動側に供給する。これによりエンジンの負荷平準化、総合エネルギー効率の向上を実現している。サーマルハイブリッドは熱エネルギーについて同様の構成を有する。エンジンからの排気熱系に蓄熱機能を組み込み、余剰熱を蓄熱し、熱利用側の需要に応じて熱を供給する。また、熱の入出力制御のためにパワーコントローラが組込まれる。エンジンからの余剰排熱を貯蔵、活用することで、エンジンの負荷変動を軽減し、効率的な条件でエンジン操作を行うことで総合エネルギー効率の向上が可能になる。このシステム開発に向けて要素技術の検討を進めている。

高温プロセスもハイブリッド化によりエネルギー効率の向上が期待できる。熱源としては原子力発電所からのオフピーク熱および電力、また各種コジェネレーションエンジン、太陽熱システム、燃料電池、高温産業プロセス廃熱などが対象となる。

蓄熱機能のハイブリッド化の実現には中温域で駆動する蓄熱装置が必要であることから、中温域向けケミカルヒートポンプを検討してい

る。ケミカルヒートポンプは化学反応による蓄熱機能を有しており、単位体積あたりの蓄熱量が潜熱・顕熱蓄熱に比べ相対的に大きく、反応物として長期間蓄熱ができる点で効果が大きいと期待できるからである。しかしながら中温域のためのケミカルヒートポンプを含む蓄熱技術の事例は少なく、未だ開発の余地は大きい。ケミカルヒートポンプは利用する化学反応でその蓄熱性能が定まる。本研究室では気固反応系化学蓄熱に注目し、中温域むけのケミカルヒートポンプ開発を進めている。とくに酸化マグネシウム/水 (MgO/H₂O) 系に着目し検討を進めている。



この反応系は 200 ~ 400℃ 前後で可逆的に反応が進み中温余剰熱の貯蔵、熱出力が可能である。材料の酸化マグネシウムは海水由来であり、材料制約が少なく、自ら安全な材料であるため、社会受容性が高いことが長所である。反応速度、材料の繰り返しに対する耐久性、向上が重要であり、現在様々なアプローチからの性能向上と材料開発を検討している (図 2)。また、反応材料の伝熱性、成形性も同様に重要であり高伝熱材料との複合化などの検討を進めている。

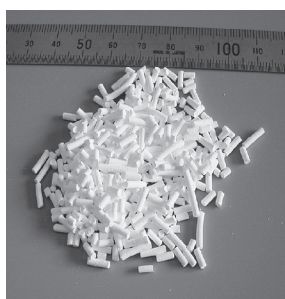


図2 ケミカルヒートポンプ用に開発した繰り返し高耐久性を有する水酸化マグネシウム反応材料

能動的な炭素循環型エネルギーシステム

一次エネルギーの多くを海外に頼るわが国にとってエネルギーの供給安全保障は産業・経済発展のために重要である。原油・資源価格の高騰による経済混乱は時代に依らず、わが国の大

きな課題である。筆者は炭素供給の観点からエネルギー供給安全保障の確立にむけてシステム提案を進めている。

産業のみならず人類の生活において炭素は燃料源、材料素材として最も普遍的で重要なエネルギー媒体である。持続的な社会の形成のためには炭素の安定供給が必須である。一方で京都議定書が 2005 年に発効し、わが国はその遵守に義務を負い、いよいよ抜本的な二酸化炭素 (CO₂) 排出削減が必要となっている。製造産業、サービス産業にとって CO₂ 排出削減は炭素利用の制限に直結し、産業活動の停滞を招く大きな課題である。よって CO₂ の排出削減と炭素供給安全保障の両立というジレンマが産業発展の重要な課題になっている。

そこで筆者は炭素を循環利用するエネルギーシステムを検討している。既に自然の植物界においてカーボンニュートラルとして炭素循環系が存在するが、あらたに「能動的な炭素循環エネルギーシステム」(Active Carbon Recycling Energy System, ACRES) を提案している。ACRES は二酸化炭素を炭化水素に再生し、再利用するものである。このシステムが成立することで炭素が系内を循環再利用され、系外への CO₂ 排出無くエネルギー供給が可能となる。ACRES のシステム構成を図 3 に示す。システムは三つのプロセスからなる。すなわち炭化水素利用過程、CO₂ 回収・分離過程、炭化水素再生過程である。炭化水素は利用過程においては熱源、材料素材の双方として利用ができる。エネルギー消費後の炭素は CO₂ になる。CO₂ 回収・分離過程において、CO₂ 回収には吸収、収着 (物理収着、化学反応を含む複合吸収現象) の利用がある。回収した CO₂ は吸収媒体から分離する過程が必要となる。物質分離には熱の入力を要する。この過程で CO₂ の高濃度化が行われる。回収された CO₂ は外部エネルギーを利用して炭化水素再生過程にて炭化水素に再生される。

これまでの研究から、循環炭素媒体としては一酸化炭素 (CO) が有力であり、二酸化炭素からの再生には再生可能エネルギー源を用いた

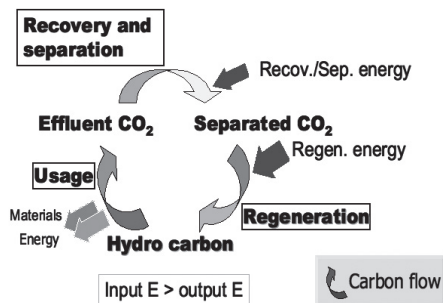


図3 能動的な炭素循環型エネルギーシステム (ACRES) の基本構成

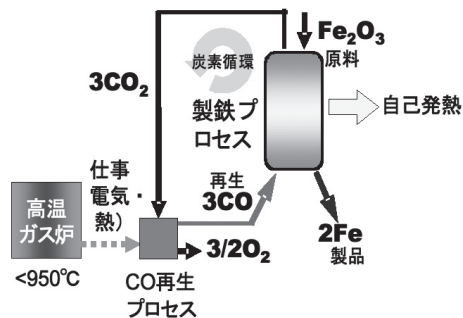


図4 ACRESの製鉄への応用例

電気分解が有用である。エクセルギーは電気が100%に対してCOは97%とほぼ等価であり、効率は蓄電池のエネルギー貯蔵効率と同様と見なせる。電気からCOへの変換損失 (<math>< 10\%</math>) が許容され、かつ電気よりCOがエネルギー媒体として有用な場合にこの系は成立する。これまでの基礎的評価から製鉄プロセス、化学産業プロセスへの応用が期待できる。変換損失は二酸化炭素回収貯留 (CCS) に用いる電気エネルギー損失分より小さくなると期待でき、環境中にCO₂を排出しない、新たな低炭素技術になると考える。また、一次エネルギー源としては量的には、原子力が有力な候補であり、とくに電気分解は高温で有利に進むことから高温ガス炉型原子炉 (High Temperature Gas Reactor, HTGR) が適している。また非定常な再生可能エネルギーも対応可能である。

ACRESは製鉄分野が応用対象として検討を進めている。図4に製鉄プロセスを対象とした提案するACRESの構成を示す。本システムの操作は次の(1)から(3)となる。すなわち(1) HTGRなどの原子力エネルギーから発生する電力、高温熱を用いて、二酸化炭素 (CO₂) を電気分解し一酸化炭素 (CO) を発生させる、次いで(2) COにて酸化鉄の還元を行う。酸化鉄の還元にはCO₂とCOとの反応平衡があり、CO₂とCOの混合ガスが製鉄プロセスから排出される。(3) CO₂・COを化学的に分離回収し、分離したCO₂は電気分解プロセスへ、COは再度製鉄プロセスに循環させる。この炭素循環システムによって、現行の製鉄プロセス

を変えること無く、かつCO₂の大気放出無く、CO還元による製鉄が可能になる。現在、このシステムの定量的な評価を進めている。

研究室活動

幸いにも良きスタッフ、学生に恵まれている (写真1)。筆者は理工学研究科原子核工学専攻教員として、博士3人 (内社会人博士1名)、修士2年4名、修士1年2名を得ている。本専攻は学部を持たず、修士学生を学内外から迎えて運営されている。常に学生の募集努力が求められる。ありがたくも毎年、エネルギー研究の志を高く持った若者に来て頂いている。韓国、インドネシア、イタリア、モンゴルより留学生を迎えている。各国の歴史・文化・精神性は興味深く、日本人として学ぶことが大変多くありがたく思っている。教員の慌しさをものともせず、和気藹々と過ごしてくれていることが、何にも変えがたい喜びである。メンバーの成長を願いつつ、協力して上記の研究を続け、縁あって頂いた原子力エネルギー利活用の分野で今後も研鑽を進めたく思う次第である。



写真1 原子炉研前での研究室メンバー