

1. 趣旨

化学プロセスの合理的な開発・設計・操作を支援することを目的とする学問として発展してきた化学工学は、対象とするプロセスから要素となる現象を抽出し、その本質と動的特性を定量的に捉え、さらに最適化することにより、物質・材料の高機能化と効率的生産のための方法論を提示してきた。東京電力福島第一原子力発電所の事故から6年半が経過し、緊急処置から次第に定常的な処置に移行してきている。そして、これまで実施されてきた様々な取り組みの成果が明らかになると共に、困難な点も明確になってきている。これまで提案、実施されてきた様々な取り組みを総括し、得られているデータをフルに活用して、除染技術のモデル構築や、コストを意識した除染法、廃炉技術の提案を行っていくことが、化学工学を専門とする技術者の責務であり、またそれが方法論の学問として発展してきた化学工学が最も貢献できる分野でもある。このような観点から、福島原発事故対策に関して、今後化学工学が貢献できる分野、貢献すべき分野に関する提言を行う。

2. 地域の課題

2.1 土壌除染

土壌除染の問題は、未除染地域（森林、高汚染地区）の除染、除染土の処理、湖沼底泥の除染に大別できる。2000万 m^3 とも推計される汚染土壌や分散して仮置きされている汚染土壌の量を考えると、全てを中間貯蔵設備に移送するか、あるいは中間基地である程度分別し、高汚染土のみを中間貯蔵設備に移送すべきかの検討が必要であり、その検討に利用できる分別法を提示していく必要がある。

放射性セシウムは主としてサブミクロン以下の細粒土に吸着していることが知られており、大量の土壌処理を経済的に行うためには、分級処理が有効な手法の一つである。従来の技術では100 μm 程度が分級の限界とされており、また、洗浄が十分でないために処理土の放射物質濃度の低減が難しいとされてきた。この課題を解決するためには、化学工学の理論を応用した、大量処理を前提とした新しい洗浄技術（分級技術）、分離技術（サイクロンや膜分離）の提案を行っていくことが重要である。また、汚染土壌の中には、これまで様々な化学処理が施された物も存在する。そのような土壌の扱いについても検討が必要である。

湖沼底泥の除染については、汚染された微小粒子の再分散を防ぐことが重要であるが、分級操作により汚染土の分別に関しては、土壌と同様な方法を開発していく必要がある。

上記の方法で分級されたサブミクロン以下の細粘土は、高放射能濃度となる。よって、その長期安定的な貯蔵法についても、化学工学的見地から検討していく必要がある。放射性物質の吸着メカニズムのモデル化等を通して、化学工学理論に基づいて流出防止策を構築することが望ましい。また、これまで報告されている放射性物質の吸着に関するデータは、化学工学分野における超微量吸着に関する理論の発展にも寄与するもので有り、当分野への化学工学研究者の関与を期待したい。

2.2 汚染物質の焼却処理

燃焼可能な汚染物質については、これまで様々な放射性廃棄物焼却設備が、建設・運転されてきた。趣旨の項でも述べたように化学工学の特徴は、対象とするプロセスから要素となる現象を抽出し、その本質と動的特性を定量的に捉え、さらに最適システムを構築することである。様々な物質の燃焼を含む複雑な焼却設備の運転データを集約、解析することで、放射性廃棄物焼却設備の建設・運転指針を取り纏めることは、今後の廃炉に伴う廃棄物処理を効率的に行うために有用である。化学工学会およびその会員は、そのようなとりまとめに積極的に貢献すべきである。

3. サイト内の課題

3.1 建物外敷地除染

サイト内除染が汚染水処理と大きく異なる点は、様々な核種、濃度、様態の放射性固体廃棄物が対象という点にあり、分散する汚染固体の実態把握が必須である。政府機関や東京電力を中心に、廃棄物及び放射性核種のインベントリ作成、廃棄シナリオ策定、廃棄処分技術のサーベイが行われているが、最終的には複数の廃棄処分技術を組み合わせる用いることになる。その際には、廃棄物をいかに処理するかというフォワードな発想での技術選定に加え、最終処分物（製品）を廃棄物（原料）からいかに作るかというリバースロジスティクスの手法も必要となる。これらはプロセスの合成問題と考えられ、化学工学が得意とする分野である。最終的には、全体として適正濃度で廃棄物量最小化のスキームを構築するために必要な技術開発を行うこととなり、化学工学技術者は、以下のような点で貢献すべきである。

1) 焼却による減容化：汚染物質の焼却では、放射能物質の飛灰、放射能物質存在下での炉の損傷への対策など、メンテナンスに関して、従来の焼却炉と異なった扱いが必要になる。上記 2.2 項で示した放射性廃棄物焼却設備の建設・運転指針のとりまとめに加え、これまでのデータを解析することにより、メンテナンス性を重視した放射性物質の焼却に適した炉の開発。さらに、高濃度放射能廃棄物に対して、部分燃焼・炭化により気体中への放射性物質の放出量を制御するような新しい分解炉の開発などに、化学工学的知見を生かし、数値流体シミュレーションなどを駆使して、積極的に関与すべきである。

2) 複数の処理の融合：化学工学では、これまで様々な単位操作を複合化させることで、その効率化を図ってきた。廃棄物総量を減らす方法としても、複数の処理の融合が有効である。たとえば、定常的に排出される廃吸着剤に対して、ガラス固化などの処理法と上記 1) で示した炭化技術との組合せによる減容化処理技術などを提示できる。

3.2 サイト内汚染水浄化

緊急時対応を経て、現在、汚染水処理が比較的安定に行われており、処理性能以外の要因も考慮した全体最適化の検討を行う時期にきている。具体的には、各汚染水に対する放射能除去離性能に加え、発生する二次廃棄物（スラッジ及び廃吸着材）の処理、保管、最終処分について、コストを意識した最適化が必要である。さらに、除染設備に関しても、単に最適な運転を行うのみならず、異種核種、異濃度汚染水の徹底的な分別（混合させない）や、汚染水採取箇所の最適化による分離設備への汚染水の最適供給など、プロセスの構造も考慮した最適化が必要である。これらは、プロセスの最適設計、操作問題で有り、化学工学技術者が大きく寄与可能な問題である。

今後も汚染水の浄化が継続して行われることを考えると、そこで用いられる大量の吸着剤の高効率化、低価格化は不可欠である。これまでの実績データをもとに挙動解析やモデル化を行い、その成果を元に新たな安価な吸着剤の開発や、その効率的な生産プロセスを構築していく必要がある。吸着材のコストダウンのためには安い原材料の発掘、開発が必要である。吸着材のモデル化は化学工学の得意とする領域で有り、非放射性物質(同位体)を使った吸着剤の網羅的スクリーニングに学会として組織的に寄与できないか、検討すべきである。

使用済み吸着剤は放射性物質を含んでいることから、新たな放射性廃棄物となる。このような廃棄物を減らすためには、吸着材の長寿命化と使用済み吸着剤の減容処理プロセスの開発が不可欠である。この点に対しても、データを元に解析し、モデル化、最適化を考える化学工学的手法を適用していく必要がある。

今後、廃炉に向けた作業が進むにつれ、非放射性イオン成分共存下での極微量放射性イオン成分の分離性能予測手法の検討、網羅的な極微量放射性核種吸着剤のスクリーニング手法の確立など、これまでと性質の異なった汚染水の浄化に対する要求が想定される。今後のニーズを把握して、新たな吸着剤の開発・評価を進める必要がある。

3.3 港湾汚染水浄化

港湾汚染水浄化の大きな問題点は、処理量が多い点（海水 16 万トン）と、もともと非放射性的のセシウムおよびストロンチウムが、それぞれ 0.0003 および 8 mg/L 溶存している点

である。地下水の汲上げや凍土遮水壁の設置が実施され、現時点では海水エリア全体では放射性 Cs と Sr はそれぞれの告示濃度（それぞれ 90 および 30 Bq/L）を超えていない。

放射性 Cs の除去に、フェロシアン化金属を固定担持した繊維が有効であることが試験的に実証されている。一方、放射性 Sr の除去には、カルシウムに対するストロンチウムの吸着選択性がさらに高い吸着材の開発が切望されている。この海水エリアの放射性 Cs と Sr を除去するとなれば、千トン程度の吸着材が必要である。そのような状況になったときには、安価な吸着剤の製造法、投入・回収方法や使用後の吸着材の取扱いを再度検討すべきである。

3.4 廃炉、燃料デブリの取り出し

デブリ取り出しは、大きく分けて、気中で取り出す方法と水中で取り出す方法の双方が検討されている（提案時点で、気中法が有力とされている）。それぞれ、放射性ダストの発生、及び、放射性核種を含む水の発生がある。リスク低減の観点から、放射性ダストの飛散対策及び水中の放射性核種の除去が必要である。前者については、ダストの飛散状況の確認のために実験とともにシミュレーション技術の適用が必要である。ダストの飛散解析は、化学工学の分野で研究が進められており、化学工学が貢献できる。後者は、Ca 等のイオン及び懸濁物を含む水溶液中からの微量の放射性核種を除去する技術の適用に関する課題であり、化学工学的手法が貢献できる分野である。

廃炉の最大の課題は高線量放射性物質の取り扱いであり、また高線量であるが故に現場に直接立ち入れない。そのため、個々の除染技術に加え、ビジュアル化を含むシミュレーション技術やシミュレーションの精度を上げるためのモデリング、モニタリング、状態推定技術が不可欠である。これらは、化学プラントを対象に化学工学が長く取り組んできた技術で有り、本学会会員の貢献が望まれる。また、高線量であることを考えると、遠隔操作を前提としたロボット技術とのインテグレーションも不可欠となる。これを前提としたシステム設計、設備設計、運転管理・安全管理の推進、長期運転に関する設備保全体制の確立（設備の腐食問題解決を含む）のために化学工学会が果たすべき役割は大きい。

デブリ取り出しに関しては、未知の要素が多く今後も様々な問題点が生じる可能性があり、計画通りに進むとは限らない。このような状況下においては、建屋内、炉内への地下水の流入が防止できれば、デブリ取り出しの時期に余裕ができる。建屋内外の水の流れ情報から漏水箇所の特定制への数値流体力学シミュレーションの適用や、その補修のための化学物質の開発などは、化学工学の貢献できる内容である。

デブリ取り出しには、様々な機器が導入されるが、それらは利用後新たな放射性廃棄物となる。よって、そのような機器類は将来放射性廃棄物となったときの処分法、再利用法をあらかじめ想定して設計、製作すべきである。1回の使い捨てであれば、プラスチックの利用も検討すべきである。樹脂技術の進化はめざましく、複雑で高強度の製品を製作できる可能性も高い。このような面からも化学工学者は廃炉技術の進展に貢献すべきである。

3.5 安全、リスク管理

原子力発電所は、想定される様々な事故に対して多重の安全策を考え、それらをシステム化することで事故の確率を小さくしてきた。しかしながら、これらの対策は事故を防止するためのものであり、事故が生じてしまった現状からの除染、廃炉作業は、未だ誰もが経験したことがない、かつ非定常で難度の高い業務であり、従来の原子力発電所の安全に関する考え方の延長ではできない作業である。

現在の福島第一発電所は、「発電所」ではなく、廃棄物(原料)を安全な物質(製品)に変換する施設である。高濃度で多様な放射性物質を扱うことから、処理技術開発、設計、運転、品質保全、物流、保全、安全環境管理、外部とのコミュニケーションなど、新規で難度の高い業務から成る。このような廃炉作業の現場では、人が安全の要となる。安全は組織とその構成員の文化であり、人に着目したリスク管理の原理が必要となる。そこでは、作業に伴うヒューマンエラーの可能性を考慮しなければならない。化学企業では、米国労働安全衛生局(OSHA)が示すプロセス安全管理指針(PSM)のような包括的な安全管理システムを参考に、

長に年月をかけ安全に関する文化を育ててきた。福島第一発電所も、物質、人、機械、作業法全般にわたって、リスク度の定義を明確化、定量化し、1つのプラントとしての安全に関する文化を育てていく必要がある。それには、原子力を専門としてきた技術者のみでは不可能で有り、様々な分野の技術者の協力することにより、多くの困難な問題に対処することが期待できる。数多くの事故を体験しながら安全やリスクに向き合ってきた化学企業における安全に関する考え方は有用であり、化学工学の技術者もその中に飛び込むべきで、一様でない、価値観や経験、知識を提供できる。

3.6 除染、廃炉のための工場運営

福島第一原子力発電所は、事故後は電気という単一の製品を生産するプラントではなく、化学工場のような設備と技術開発、設計、運転、品質保全、物流、保全、安全環境管理、外部とのコミュニケーションをふくめ多様な業務を行うべき所となった。工場として、企業としての体質を、現場を制定し廃炉を行うという業務体系の工場に変えていかねばならない。事故発生後6年が経過した現在、緊急対応の陣容から、長期的な廃炉技術の開発と廃炉実現の体制に変えていく必要がある。求められるのは、

- ・ 作業者のモチベーションの維持向上のための仕組み
- ・ 現場技術開発体制の取り込み強化、外部の研究開発機関も含め組織を越えた連携
- ・ 技術開発、プロセス設計、運転、品質保全、物流、保全、安全環境管理、広報の各部門間でリアルタイムに情報を共有し、各部門の廃炉作業に伴うリスクの定量化し、同時に廃炉作業全体のリスク最小化するシステムの構築。
- ・ 外部から人を入れることによる、外部の経験と知恵の導入

であり、化学工学エンジニアが得意としてきた、あるいは経験した分野である。安全や環境も含めた経験や知識は、今や発電所にはなくなつた福島原発に寄与できる。現在、5000～7000人の作業者が毎日廃炉作業に従事しているが、石油化学工場の定期修理においても同規模の人員を入れ、管理することはあり、化学工場を管理する技術者にとっては特別のことではない。原子力関係者に協力することで、より安全で効率的な廃炉に向けての工場運営が可能と考える。

4. 連携・体系化

これまで述べてきたように、福島原発事故に関わる問題において、化学工学を専門とする研究者や技術者が積極的に関与できる（関与すべき）課題が多く存在する。そして、関与すべき課題に関しても、多くの情報が公開されている。化学工学会としては、これらの問題に会員がより容易に寄与できる仕組み作りが必要と考える。多くの研究者や技術者は、福島復興・廃炉促進に貢献したいが、そのみに専念できる状況にない。このような研究者や技術者にとっては、現状は「情報の洪水」であり、各自が貢献できる分野の情報にたどり着くに苦勞する状況にある。また、情報発信者も、適切なコメントが得られる研究者や技術者の所在がわからないのが現状ではないかと想像する。適切な情報が適切な研究者や技術者に届く仕組み作り及び情報整理が必要である。このような仕組み作りと情報整理を化学工学会のみで構築することは不可能で有り、他の学協会との連携を深めることで、その実現を促進すべきである。

福島原発事故対策は本提言で取り上げた問題に留まらず、多様な問題を含んでいる。原子力関係者のみで解決できる問題ではなく、学界、業界の枠を越えて専門的学識を結集して初めて解決できる課題も多い。このような観点から、化学工学会は原子力学会に働きかけ、「福島復興・廃炉推進に貢献する学協会連絡会」の設立に貢献し、その後の活動に協力してきた。本組織の積極的な活動に期待すると共に、化学工学会から連携に関する提言を積極的に行っていく必要がある。例えば、解決すべき課題が、上記の学協会連絡会に集中して集められ、そこから各学協会に発信され、それを受けた各学協会が、その情報を共有すべき適切な下部組織に情報を伝達する、というような仕組み作りが考えられる。必要とする情報が、必要とされる研究者や技術者に届くことが重要である。また、個別の課題に関する学協会の枠を超えた研究報告会やワークショップの開催を積極的に提案していくべきである。

廃炉は非常に長期間にわたるプロジェクトとなることから、それを安全かつ効率的に完遂させるためには、個々の技術に精通すると同時に全体を俯瞰できる人材育成が必要である。既に行われている JST(科学技術振興機構)の「廃炉措置研究・人材育成プログラム」の中で既に、化学企業から「化学プロセスの危機管理」等のテーマに係わり講師が派遣されている。既に動いているこのような「場」に化学工学会として積極的に人材を派遣するとともに、除染や廃炉に関する理論的項目に関して、化学工学の研究者が教育に利用できる資料を整備していくべきである。また、除染や廃炉に係わる現在進行中の「巨大プロジェクト」で産み出されている貴重なノウハウを散逸させず「世界の財産」とするために、これまでオンサイトやオフサイトで実施されている多くの除染や減容化設備の運転データの集約や解析をすすめ、例えば「除染・減容化設備設計・運転指針の体系化」というような資料整備を図ることも、化学工学会の重要な役割と考える。

以上、福島原発事故対策に関して、化学工学会福島原発事故対策検討委員会から学会員および関係諸氏に提言する。