

日本原子力学会2020年秋の大会 原子力安全部会企画セッション
「SMR等革新炉の安全と安全規制について -今後の取組-

小型モジュール炉に係る諸外国の規制動向

Regulatory Trends on SMRs in other countries

2020年9月18日

MRI 株式会社三菱総合研究所

原子力安全事業本部 システム安全グループ

鈴木 清照

目次

小型モジュール炉の概要	3
小型モジュール炉の規制・許認可について	7
米国における小型モジュール炉の安全規制について	14

小型モジュール炉（SMR）の概要

- (1) SMRの特徴
- (2) SMRの開発状況

(1) SMRの特徴／概要

現在、以下の特徴を有する小型モジュール炉（SMR）の開発が各国で進められている

- 出力300MWe以下
- 電力需要に応じて、モジュール数で出力を変更可能、**工場**で製造、トラックで輸送
- 現地で組み上げることで、工期の短縮、**初期コストの抑制**が可能
- 出力が小さく、冷却機能喪失時に、**自然冷却**による炉心冷却が可能

（開発が進められている主なSMRの分類）

軽水炉	既存軽水炉技術に基づくため、技術的なリスクは低い
高温ガス冷却炉	発電の他、熱エネルギーを使った水素製造等にも利用
液体金属高速炉	従来から高速増殖炉として各国で開発
熔融塩炉	液体のトリウム及びウランフッ化物を燃料として使用

(1) SMRの特徴／規制評価の視点

施設の大きさ

- 小さなプラント設置面積
- 小さな炉心出力（小さな崩壊熱、炉心の安定性、ソースタームの量、等）

新しい技術の採用

- 受動的冷却（自然循環冷却、重力駆動）
- 一体設計（一次系のベッセルへの統合）
- 核分裂生成物に対する障壁数の違い
- 特有の燃料設計（セラミック材料、溶融塩燃料）

モジュール設計

- コンパクトでシンプルな設計（いくつかのシビアアクシデントの排除、構造物が少ない、等）
- 新たな事故（隣接モジュールの影響、等）
- 中操スタッフ・機器の共用
- 複数モジュールの同時故障、等

設置、輸送

- 設置場所（地下、洋上、水中、輸送式、グリッドが未発達な地域への設置、等）
- モジュールの輸送（建設段階、運転段階、燃料装荷、等）

参考) IAEA SMR Regulator's Forum, "Pilot Project Report: Considering the Application of a Graded Approach, Defence-in-Depth and Emergency Planning Zone Size for Small Modular Reactors" (2020年9月8日閲覧)
<https://www.iaea.org/sites/default/files/18/01/smr-rf-report-29012018.pdf>

(2) SMRの開発状況

- 2030年まではVVER、その後は高速炉及び第4世代炉へ移行の計画



KARAT-45
KARAT-100
VK-300
RITM-200
RUTA-70
ABV-6E
KLT-40S
RITM-200M
VBER-300
SHELF
ELENA
UNITHERM
GT-MHR
MHR-T Reactor/Hydrogen Production Complex
MHR-100
BREST-OD-300
SVBR-100



UK SMR
Stable Salt Reactor - Wasteburner
Stable Salt Reactor - Thermal Spectrum

- SMRを含む第4世代の先進モジュール炉開発に注力
2020年までの3年間で4,400万ポンドの予算を確保



ACP100
CAP200
ACPR50S
DHR
HTR-PM

- 高温ガス炉は建設中、高速炉は2023年運開予定

CAREM	Argentina
IRIS	Multiple coutory
SMART	Republic of Korea
AHTR-100	South Africa
HTMR-100	South Africa
PBMR®-400	South Africa
LFR-AS-200	Luxembourg
LFR-TL-X	Luxembourg
Integral Molten Salt Reactor	Canada
CMSR	Denmark
Copenhagen Atomics Waste Burner	Denmark
ThorCon	International Consortium
Molten Chloride Salt Fast Reactor	USA and Canada
SEALER	Sweden



BWRX-300
mPower
NuScale
SMR-160
Westinghouse SMR
SC-HTGR
Xe-100
Micro Modular Reactor
EM2
SUPERSTAR
Westinghouse Lead Fast Reactor
Liquid Fluoride Thorium Reactor
Mk1 PB-FHR
Westinghouse eVinci® Micro Reactor

- 原子力産業の再生支援等を目的にSMR、先進炉開発に注力
NuScale、Terrestrial energyは、2020年代の商用化へ

世界で50以上のSMRが開発中

小型モジュール炉の規制・許認可について

- (1) SMRの規制に関する国際的な動き
- (2) 諸外国におけるSMRの許認可状況

(1) SMRの規制に関する国際的な動き (1 / 2)

- 2015年、開発国の規制当局を中心に、国際原子力機関（IAEA）にSMR Regulator's Forumを設置、各国のSMR規制に関する知見と経験を共有
- SMRベンダー等は、サイズの小ささや、モジュール設計等の従来とは異なる建設アプローチを踏まえ、SMR用の規制枠組みへの修正等を要求しているが、**多くの場合、新しいプロセスの構築は不要との見解で一致**
- 2015年～2017年までPhase I（Pilot Project）を実施し、以下3つのポイントを整理
- Phase IIでは、①Licensing Issue、②Design and Safety Analysis、③Manufacturing, Commissioning and Operationを議論し、2020年末までに最終報告書を発行予定

Phase I での議論



Graded Approach

- **SMRの安全設計の不確かさにより、より多くの実証が必要**
- そもそも、「Graded Approachとは何か、それほどのように適用されるべきか」という共通認識を持つため、**IAEAが技術図書を構築**するのが望ましい

Defence in Depth

- SMRの特徴としてのLevel 1,2の強固さの実証に加え、**Level3,4の実証も重要**
- 受動的安全系に関する安全基準の構築、発生事象の除外のクライテリア、複数モジュールの安全評価に関する要求の構築等が必要
- **PSAは重要なツール**である

EPZ

- SMRの設計およびサイトの**特徴を踏まえ、EPZのサイズを検討**することが必要
- EPZの決定に際し、pre-application processが検討されるとよい

参考) IAEA SMR Regulator's Forum, "Pilot Project Report: Considering the Application of a Graded Approach, Defence-in-Depth and Emergency Planning Zone Size for Small Modular Reactors" (2020年9月8日閲覧)
<https://www.iaea.org/sites/default/files/18/01/smr-rf-report-29012018.pdf>

(1) SMRの規制に関する国際的な動き (2 / 2)

- 2018年、元NRC委員長のMeserve氏が、IAEAの天野事務局長（当時）に、特に非軽水炉型の先進炉の規制に関する提言を提示

Meserve氏レター要旨

- 従来の2ステップ（建設、運転）の許認可では、事業者にとって許容できない財政リスクがあり、これは、米国で採用した設計認証（DC）プロセスでも同様
- 他分野の先進技術においては、リスクの低減とともに多くの投資を呼び込む仕組みとなっており、原子力においても、**段階的な規制活動**となることが望ましい
- 軽水炉向けの規制要求は、決定論的手法を採用しているが、運転経験を通して、改善されてきている
- 軽水炉向けの規制要求の多くは、先進炉では検討不要（特にLBE（Licensing Basis Events）の定義）
- **リスク情報を活用した意思決定プロセス（RIDM）が適用**されるべき

参考) IAEA, "Meserve's letter to Amano" (2020年9月8日閲覧)
https://www.iaea.org/sites/default/files/2018_annual_letter_final.pdf

- その他、世界原子力協会（WNA）のCORDEL WGにおいて、2013年にSMR Ad-hoc Groupの立ち上げ、効率的な規制の在り方などを議論し、2015年に「Facilitating International Licensing of Small Modular Reactors」を発行 → SMRの技術的特徴を把握することの重要性を指摘

(2) 諸外国におけるSMRの許認可状況（米国）（1 / 2）

- 2020年8月現在において、米国では、**SMR関連の3件の許認可関連対応が進捗**
- Oklo社は、非軽水炉で初となるCOL申請を提出

種類	申請者	対象SMR	タイプ	状況
DC	NuScale	NuScale	軽水炉	2016/12 : DC申請書を提出 2019/12 : DCの第4段階レビュー完了 2020/ 8 : DCのレビュー完了、FSER発行
ESP	TVA	NuScale mPower SMR-160 Westinghouse SMR	軽水炉 軽水炉 軽水炉 軽水炉	2016/ 5 : ESP申請書を提出 ※4設計を包絡する内容 2019/12 : ESPの発行を承認
COL	Oklo	Aurora (Microreactor)	小型高速炉	2020/ 3 : COL申請提出 2020/ 6 : COL申請受理

DC（設計認証） : 建設・運転許可とは独立して、プラント設計の認証を行う。サイトとは独立した、安全設計等をレビュー
 ESP（早期立地許可） : 建設・運転許可とは独立して、サイトの許可を行う。立地の安全性（緊急時計画含む）と環境影響をレビュー
 COL（建設・運転一括認可） : ある特定のサイトにおけるプラントの建設許可と条件付き（ITAAC）運転の認可を行う。

参考) Pre-application activitiesを実施中。

軽水炉 … SMR-160 (Holtec), (GE Hitachi Nuclear Energy)

非軽水炉 … General Atomics, X-energy, Karios Power, Terrestrial Energy, TerraPower, Westinghouse

参考) NRC, "Application Review Schedule for the NuScale Design" (2020年9月8日閲覧) <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr/nuscale/review-schedule.html>

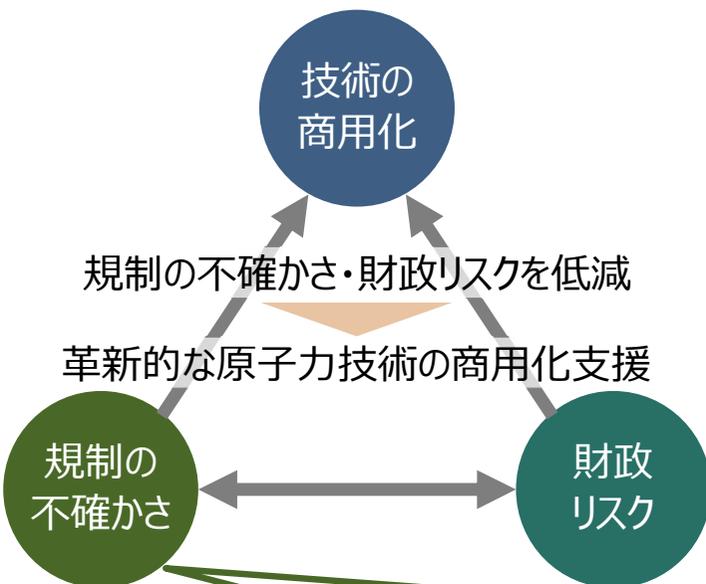
参考) NRC, "Early Site Permit Application - Clinch River Nuclear Site" (2020年9月8日閲覧) <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr/clinch-river.html>

参考) NRC, "Combined License Application Documents for Aurora - Oklo Power Plant Application" (2020年9月8日閲覧) <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/col/aurora-oklo/documents.html>

参考) NRC, Small Modular Reactors (LWR designs)" (2020年9月8日閲覧) <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr.html>

参考) NRC, "Advanced Reactors (non-LWR designs)" (2020年9月8日閲覧) <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/advanced.html#preAppAct>

(2) 諸外国におけるSMRの許認可状況（米国）（2 / 2）



エネルギー保障、環境、国家安全保障のニーズを満足する技術として
原子力イノベーションに関する技術開発、商用化を支援

▶ **ベンチャー企業にも、積極的な支援を提供**

連邦政府としての取組

- 2012年：SMR許認可申請支援（LTS）プログラム（\$452M）
- 2017年：先進原子力技術開発資金提供公募（FOA）（\$400M）
→ 2024年まで継続の予定
- ワンストップ窓口「原子力の技術革新を加速するゲートウェイ（GAIN）」

連邦政府としての取組：NRC-DOE Joint Initiative - Non-LWR Design Criteria

DOEとNRCで、非軽水炉の一般設計規則：General Design Criteria（GDC）を議論（2013年～）

- DOE主導のPhase 1：2014年12月に、非軽水炉の設計規則の構築のガイダンスに関する報告書を発行
- NRC主導のPhase 2：DOEの報告書のレビューを実施
→ 2018年4月に、NRCより、「非軽水炉へのGDCの適用に関する規制ガイダンス案」を発行

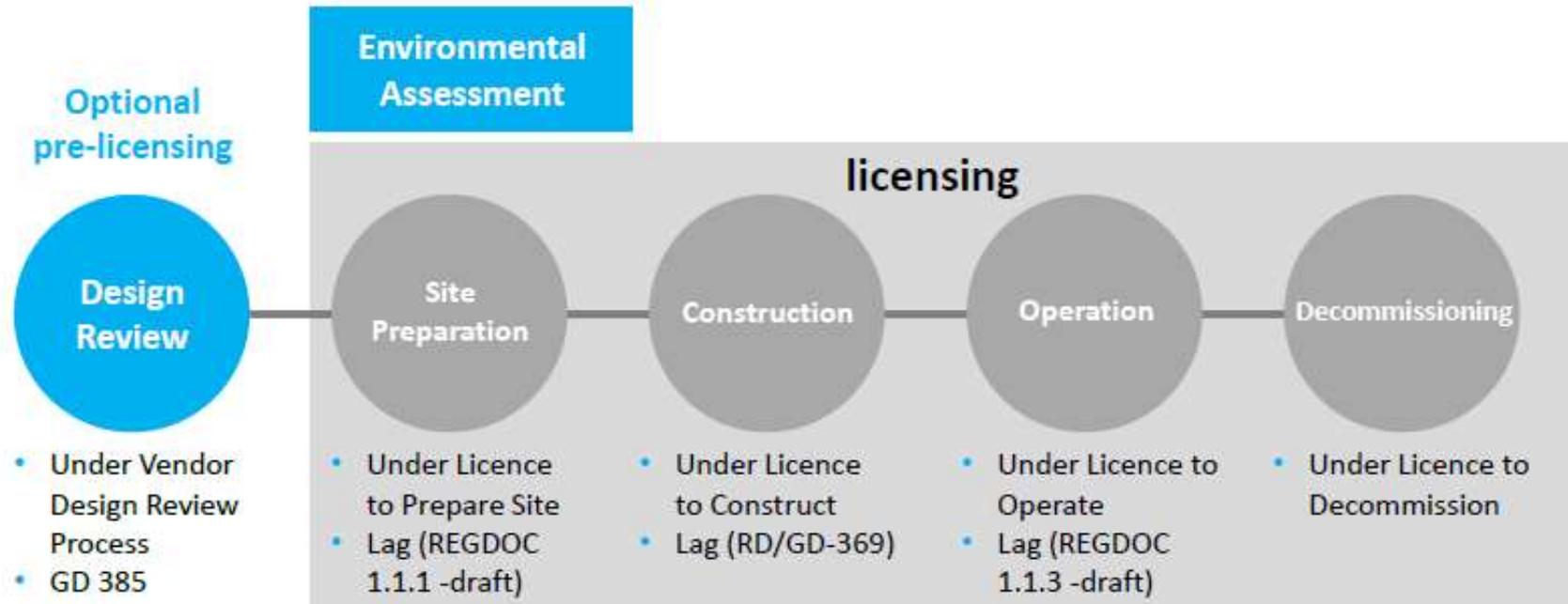
産業界としての取組：Licensing Modernization Project

- 事業者（Southern Company）により主導、NEIによる協力と、DOEの費用負担により推進
- 非軽水炉の先進炉に関して、リスクインフォームド、パフォーマンスベースの設計、許認可を促進、2020年6月に、NRCは規制ガイド（Regulatory Guide 1.233）を発行（NEI 18-04 Rev. 1をエンドース）
- 2027年（予定）に、先進炉向け許認可手続きとして10 CFR 53の発行を計画

参考）NRC, "REGULATORY GUIDE 1.233 REVISION 0"（2020年9月8日閲覧）<https://www.nrc.gov/docs/ML2009/ML20091L698.pdf>

(2) 諸外国におけるSMRの許認可状況（カナダ）（1 / 2）

- Vendor Design Review (VDR) … ベンダー要求に基づき実施されるCNSCによる任意の手続き
 - フェーズ1：規制要求への適合性について概略評価を実施
 - フェーズ2：正規の許認可活動※で障害となる事項がないか確認
 - ※サイト準備認可申請（LTPS）、建設許可、運転許可
 - フェーズ3：フェーズ2のフォローアップ
- **VDRは、許認可活動前の規制当局とのコミュニケーションを支援し、後のリスク低減を図ろうとするもの**
- VDRは許認可活動の一部ではなく、また、許認可活動に何ら影響は与えない、とされているが、許認可活動にてVDRの結果が適宜参照されることが想定され、許認可活動を円滑に進めるための重要なステップ
- VDRは、テレストリアル・エナジー社、ウルトラ・セーフ・ニュークリアー（USNC）社、ARC社、ニュースケールパワー社等、10社程度が対応中 ※**USNC社は、サイト準備認可申請（LTPS）を提出済**



出所) Canadian Nuclear Safety Commission, "Readiness For Regulating Small Modular Reactors" August 28, 2017 (2020年9月8日閲覧)
<http://www.nuclearsafety.gc.ca/eng/pdfs/Presentations/VP/2017/20170828-ramzi-jammal-nuclear-infrastructure-council-eng.pdf>

(2) 諸外国におけるSMRの許認可状況 (カナダ) (2 / 2)

2018年11月「A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors」を発行
 州政府や電気事業者により策定 → 官民一体でSMRの技術開発を推進していく姿勢を具体化

1. なぜSMRロードマップなのか
2. 我々は何をしたか – 国レベルでの協力アプローチ
3. 我々は何を聞いたか – カナダ全土におけるエンゲージメント
4. 我々は何を学んだか – 専門家ワーキンググループで得られた主要な知見
5. 国際的な状況
6. カナダにとっての潜在的ベネフィット
7. チームカナダ – 役割と責任のシェア
8. **プライオリティの高い勧告 – 進むべき道**
9. 結論 – 戦略的ビジョンと次のステップ

● 実証と実用化

- 連邦・州政府は、**産業界とコストシェア**して資金を提供すべき
- 民間投資家に**SMR商用化にインセンティブ**を与えるべき

● 政策、法制度、規制

- 環境影響評価プロセスの刷新し、SMR実用化につなげるべき
- 連邦政府は、原子力損害賠償に関する規制をレビューすべき
- SMRの**許認可や規制における柔軟性や明確さ**を確保すべき
- 核燃料廃棄物管理機関に、SMR技術詳細情報を提供すべき

● 公衆の関与や信頼

- 連邦・州及び地方政府と事業者は住民との対話を継続すべき

● 国際的なパートナーシップと市場

- 連邦政府は、国際的なSMR開発に、効率的な参画を継続すべき

※発電網が未整備の地域での発電及び工業利用等への適用を検討

参考) Canadian Small Modular Reactor (SMR) Roadmap Steering Committee, “A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors” (2020年9月8日閲覧)
https://smrroadmap.ca/wp-content/uploads/2018/11/SMRroadmap_EN_nov6_Web-1.pdf

米国における小型モジュール炉の安全規制について

- (1) SMRにおける規制枠組みの議論プロセス
- (2) SMRの安全規制事例
 - 安全規制事例1：EPZの適正化
 - 安全規制事例2：安全系の電源の取り扱い
 - 安全規制事例3：ソースタームの評価手法

(1) SMRにおける規制枠組みの議論プロセス

- 2008年時点において、複数のSMRベンダー等は、2011年頃を目途に、設計・許認可申請を提出する可能性についてNRCに通知（計6件）
- NRCは、先進炉の規制に関するNRCの基本的な姿勢として、「タイムリーで効果的な規制を提供するために、申請予定者、ベンダー、他の政府関係者に対して、**可能な限り早期にNRCとコミュニケーションを行うことを促し**、規制要求課題の早期の抽出、およびタイムリーで独立した評価を提供する」とした
- 2010年時点において、NRCスタッフは、SMRの政策、許認可、技術に関する潜在的な課題を整理
- 早期に解決が必要な課題として以下①～④を抽出し、それぞれについて、産業界とのコミュニケーションを図りながら、規制ガイダンスの作成等を実施

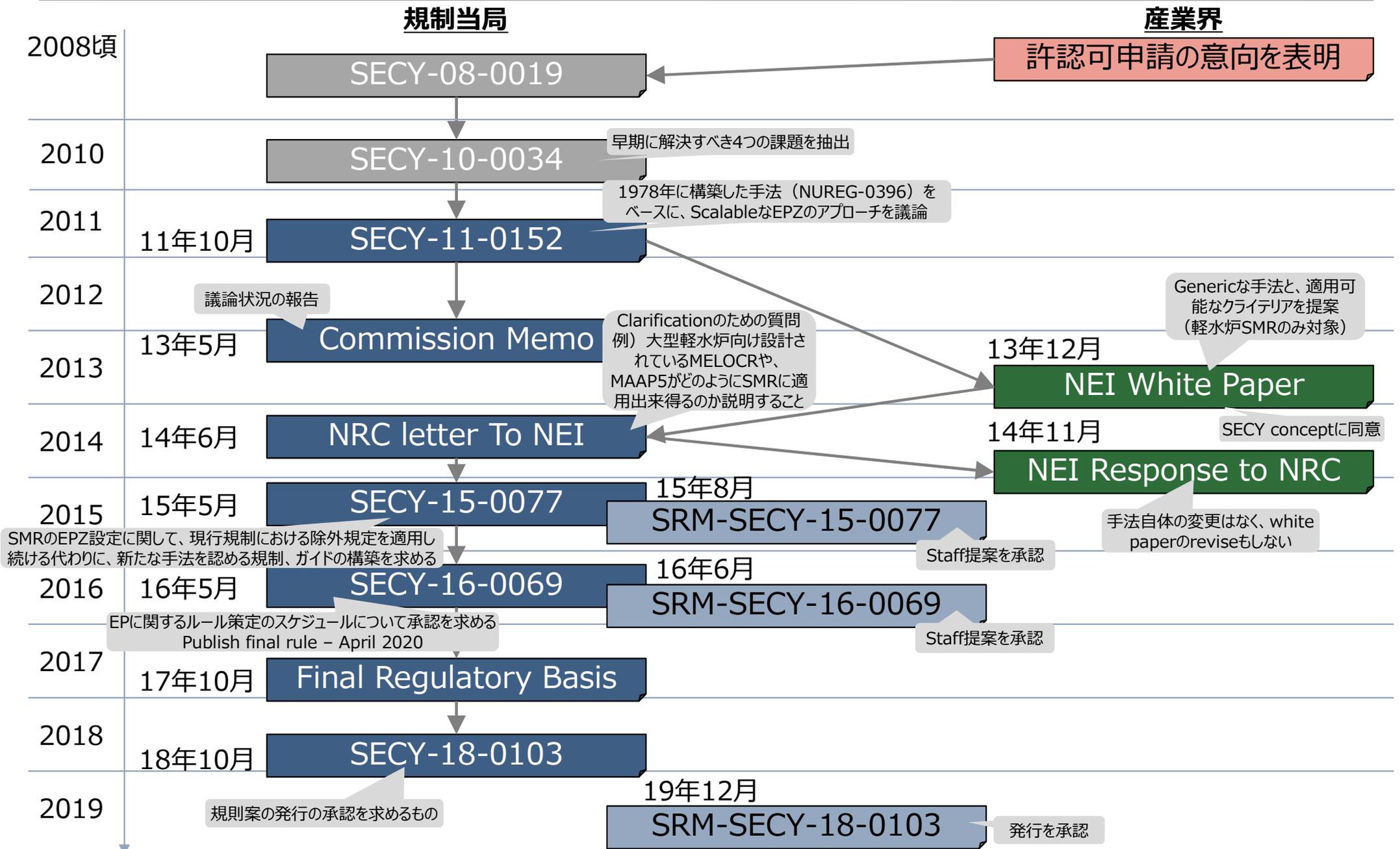
- ① 先進炉への、既存のDefense-in-Depthの思想の適用
- ② 適切なソースターム、線量計算、およびサイト選定
- ③ 運転員に関する適切な要求
- ④ セキュリティと安全保障

2020年8月現在、軽水炉SMRとして、上記②、④、および以下2点の計4点が未解決課題とされている。

- SMR他におけるオフサイト緊急時計画に関する要求
- SMRの保険と法的責任

参考) NRC, SECY-10-0034“POTENTIAL POLICY, LICENSING, AND KEY TECHNICAL ISSUES FOR SMALL MODULAR NUCLEAR REACTOR DESIGNS” (2020年9月8日閲覧)
<https://www.nrc.gov/docs/ML0932/ML093290268.pdf>
参考) NRC, “Small Modular Reactors (LWR designs)” (2020年9月8日閲覧)
<https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr.html>

(1) SMRにおける規制枠組みの議論プロセス：EPZの議論



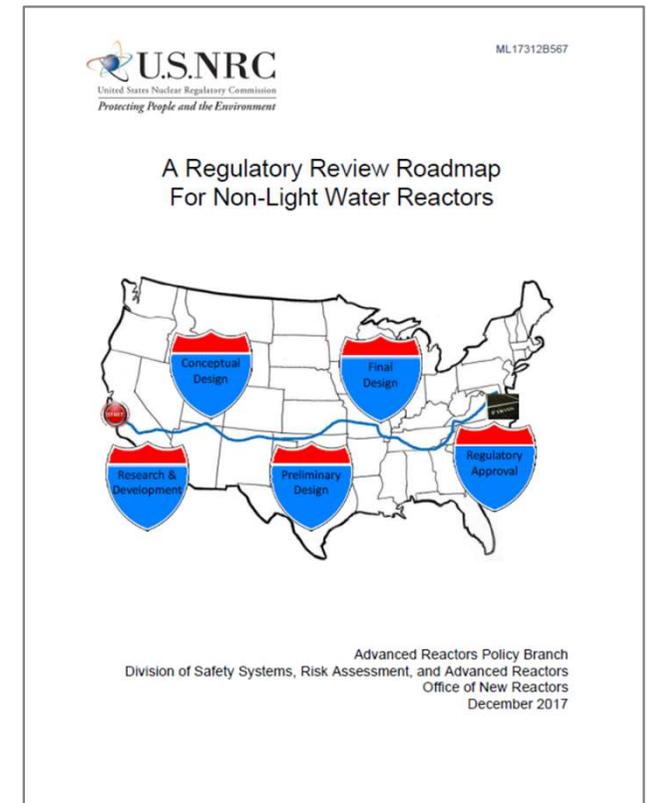
(1) SMRにおける規制枠組みの議論プロセス：非軽水炉の規制

- 2017年12月に、NRCは、非軽水炉の規制に関する潜在的な課題に対するアクションの一つとして、「A Regulatory Review Roadmap For Non-Light Water Reactors」を公表し、非軽水炉型の先進炉に対する規制対応のガイドを提示
- 許認可対応経験に乏しいベンダーにとって、どのような規制上のオプションがあり、それをどう選ぶかは、理解・対応が難しいことを踏まえ、Pre-application processから、formalな許認可対応までを整理
- 一方で、非軽水炉用の規制アプローチを定義することは、technology-inclusive frameworkの構築のよい機会であると言及

- 本Roadmapでは、様々な特徴を有する非軽水炉型の先進炉について、早い段階からNRCとinteractionすることが必要で、そのための各種の手段（formalからinformal）を整理、提示
- 特に、design stageに応じた、開発者が望む形でのinteraction、feedback等の手段（口頭、書面、安全評価等）はフレキシブルであることを強調
- 開発者には、regulatory engagement planを開発初期段階で作成するように促している

また、炉の開発における、規制要件を満たす試験要求についても整理

- ・プロトタイプ炉の取り扱い
- ・マルチモジュールに関する試験の取り扱い、等

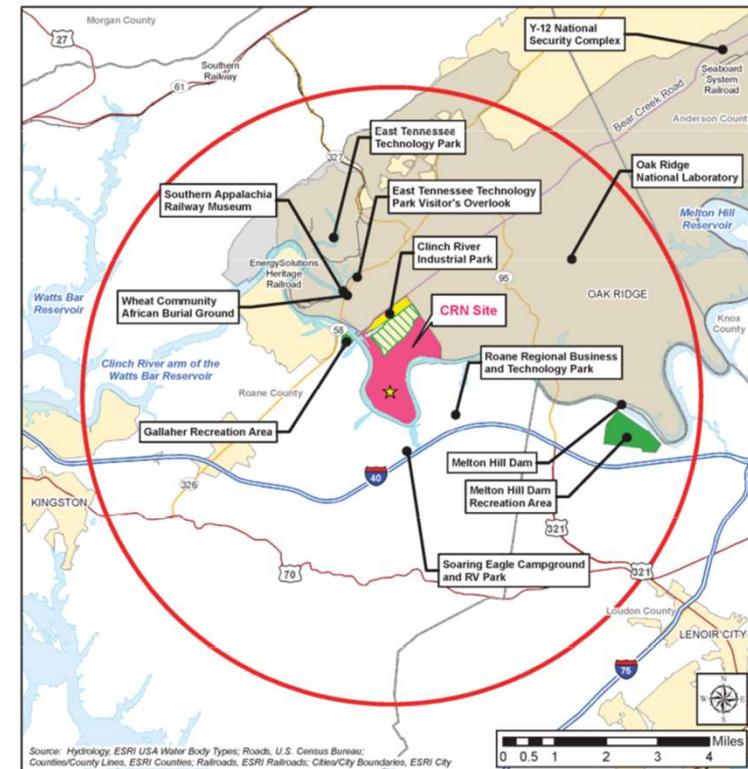


参考) NRC, "A Regulatory Review Roadmap For Non-Light Water Reactors" (2020年9月8日閲覧) <https://www.nrc.gov/docs/ML1731/ML17312B567.pdf>

(2) 安全規制事例 1 : EPZの適正化

- クリンチリバー-ESP申請では、EPZ*範囲をサイト境界内とするなどの緊急時計画の要件緩和を申請
 - 過酷事故時もオフサイトの避難等を想定しないサイト境界EPZでも、現行プラントやNRC安全目標を下回るリスクと評価
- *プルーム被ばく経路EPZ（摂取被ばく経路はCOL申請時に対応予定で未評価）

- ESPに適用したEPZの設定に関する基本的な考え方は、1978年制定のNUREG-0369から変更はない
（ただし、現行規則では、一律に10milesのEPZを設定）
 - 事故シーケンスの選定、放出のタイミング・大きさ、オフサイトでの線量を定義するために要求されるPRAからの情報を使用したうえで、PRAによる不確かさを補足
（design-specific and plant-specific PRAを適用）
 - TVAは、半径10マイルのEPZを必要とするNRC規則の適用免除を申請
-
- NRCは、線量-距離、事故影響ベースでの可変EPZサイズのアプローチは有効と判断
 - 実際のEPZのサイズは、今回認められた手法を適用してCOL内で評価、定義を行う



出所) NRC, Environmental Impact Statement for an Early Site Permit (ESP) at the Clinch River Nuclear Site Final Report (2020年9月8日閲覧)
<https://www.nrc.gov/docs/ML1907/ML19073A099.pdf>

上記のアプローチを反映したSMR向け規則を策定中
 ⇒ 規則策定までは、現行規則免除を個別判断

(2) 安全規制事例2：安全系の電源の取り扱い

- NuScaleの設計のシンプルさを示す1例として、Class 1E電源が不要であることが挙げられる
- 2017年2月に提出したTopical Report (TR) (rev.1)に対して、2018年1月にNRCが結論を提示

Class 1E電源 (IEEE Std. 323-1974)

安全系の電気設備とされており、環境への放射性物質の放出を防ぐために、緊急時のプラント停止、格納容器隔離、炉心冷却、熱除去、等に不可欠な (essential) 電気設備。

クラス1E設備は、一般的に、常用系の設備に対して、より厳格な品質管理等が要求される。

NuScale社の主張

- 電源に依存する安全系設備を有していないのであれば、クラス1E電源も不要
- ただし、安全設計上事故時に「電源が不要」としているわけではなく、事故時、事故後に必要となる電源は信頼性の高い直流電源にて供給するとしたうえで、この電源はクラス1Eとしなくてもよいとの見解
- 信頼性の高い直流電源として、従来のプラントには使用されていないVRLA (制御弁式) バッテリーの使用想定に対して、以下を示し、問題ないことを説明
 - 産業界の標準であるIEEEの関連要求を満たしていること
 - 設計基準事故を緩和する設備としては期待していないこと
 - 耐震カテゴリー1であること
 - アナログのクラス1E電源を超える信頼性を有すること

参考) NRC, "Safety Classification of Passive Nuclear Power Plant Electrical Systems," (2020年9月8日閲覧)
<https://www.nrc.gov/docs/ML1530/ML15306A065.pdf>

(2) 安全規制事例3：ソースタームの評価手法

前提：現行の規制基準

R.G. 1.183を適用（軽水炉における設計基準事故のソースタームの適用に関するガイダンス）

軽水炉において適用可能なdesign-basis accident source termsに関するガイダンスを提供。

⇒ 過度に保守的な評価

SMR・先進炉の評価において、以下を考慮すべき

- 軽水炉における事故時の核分裂生成物の放出と拡散に関する理解の向上
- ソースタームに関するSMRの特徴（NEI white paperより）
 - ① 低出力（短い燃料棒） ⇒ 少ない核分裂生成物 ⇒ 燃料損傷事故時の少ない放射性核種リリース
※これらは、既存の手法（ORIGEN2等）を用いて算出することが可能
 - ② 燃料から放出される放射性核種の割合、および物理的、化学的な性状
 - ③ 一次系での保持、閉じ込め機能の性能、格納容器を地下に設置
 - ④ 機器が集約しており、接続部も少なく、大口徑配管がない ⇒ 設計基準事故としてLOCAを排除
 - ⑤ 炉心頂部より下に貫通部なく、また、Vesselをプールに沈めており、小破断LOCAの進展を遅らせる
 - ⑥ 炉心損傷事故の進展は既存炉に比較し遅い ⇒ 短半減期各種の減衰によりソースターム量が減少

既存の軽水炉での経験、知見をもとに、PRAを用いて、Mechanistic Source Termを適用することで、現状の規制要求を満足したうえで、現状の過度に保守的な評価を避けることが可能

参考) NRC, "SECY-16-0012, ACCIDENT SOURCE TERMS AND SITING FOR SMALL MODULAR REACTORS AND NON-LIGHT WATER REACTORS" (2020年9月8日閲覧) <https://www.nrc.gov/docs/ML1530/ML15309A319.pdf>

まとめ

- ◆ SMR・先進炉の開発をリードする国を中心に、従来の規制枠組み・考え方を踏襲しつつ、規制当局と産業界とで議論を重ねながら、SMR・先進炉の安全規制を構築しつつある
- ◆ 特に、SMR・先進炉の設計を踏まえ、従来の規制において、過度に保守的となっている基準等に対して、SMR・先進炉の技術的特徴および最新の知見やツールを踏まえた合理的な規制を目指している



株式会社三菱総合研究所