

2023年10月16日

原子力安全部会セミナー

「原子力安全に関するいくつかの論点」

関村 直人（東京大学）

内容

1. はじめに
 - 問題意識の背景と安全部会の設立意図
2. ライフサイクル全体における原子力安全とリスク情報活用
 - 学協会活動と学協会規格への期待と課題
 - 対策実施基準と保守管理規定の役割
3. 安全な長期間運転と安全規制の課題
 - 米国の運転免許更新、その他の事例
 - IAEAでの課題(IGALLを含む)
 - 国際的なプラクティスと国際的な知識ベース構築・共有
4. まとめ

原子力安全全部会設立時の期待

- 原子力安全に係る個別専門分野（材料、燃料、炉工学、炉物理、熱流動等々）の部会では、原子力安全についても、個別専門分野ごとに検討されてきた。
- 原子力安全に係る活動を積極的かつ横断的に進めていくことが必要。
- その活動の基盤として、「原子力安全全部会」を設置
- 安全の「横串」を通す機能を有する部会

原子力安全部会設立時の期待

- ✓ 国民的理解の背景となり得る活動
 - 事故、不祥事
 - 地震等の自然現象時の(漠とした)不安感
- ✓ 原子力安全を重視し、安全の確認や向上に寄与する
- ✓ 学協会規格
 - 安全規制に必要な技術基準 規制側から
- ✓ 安全研究ロードマップ
 - 標準・規格の体系的な整備 産業界から
 - 安全性の向上に向けた産官学の役割
- ✓ 原子力施設の安全やリスクに関する情報の共有・発信 産業界から
- ✓ 原子力法制、規制制度のあり方
- ✓ 安全設計思想の整理、検討

原子力安全部会がなすべきこと

個別な技術分野ではカバーしきれない原子力安全に特有の分野

- 合理的な安全規制
- 体系的な原子力法制
- 実効的な原子力防災
- 長期的な原子力安全研究計画
- 安全解析手法の高度化や結果の利用法

知識の集約や普及

学会内外の専門家・専門組織と協力して、議論検討を行う

多くのステークホルダが関与する原子力安全
原子力安全を正しく理解することを望んでいる

- 公平・公正な立場で
- 原子力安全に係る事項を整理、分析
- 結果を広く発信
- 特に一般の方々、地域住民に安全問題をわかりやすく解説

原子力安全部会が活動するにあたって

対象が広範囲

- 原子力発電
- 核燃料サイクル
- 放射線利用
- 放射性物質の輸送
- 放射性廃棄物の処分
- 立地、設計、運転、保守、廃止措置、解体

✓ 専門分野の知識を総合化

✓ 安全部会には広く参加を求める

✓ 双方向の協力・支援

✓ 各機関・各分野における原子力安全に係る活動が推進されるべき

✓ 安全部会の運営には、各機関・各分野からの意見が適切に反映されるべき

福島第一原子力発電所事故

安全部会部会員は、当事者として様々な形で事故とかがかわった

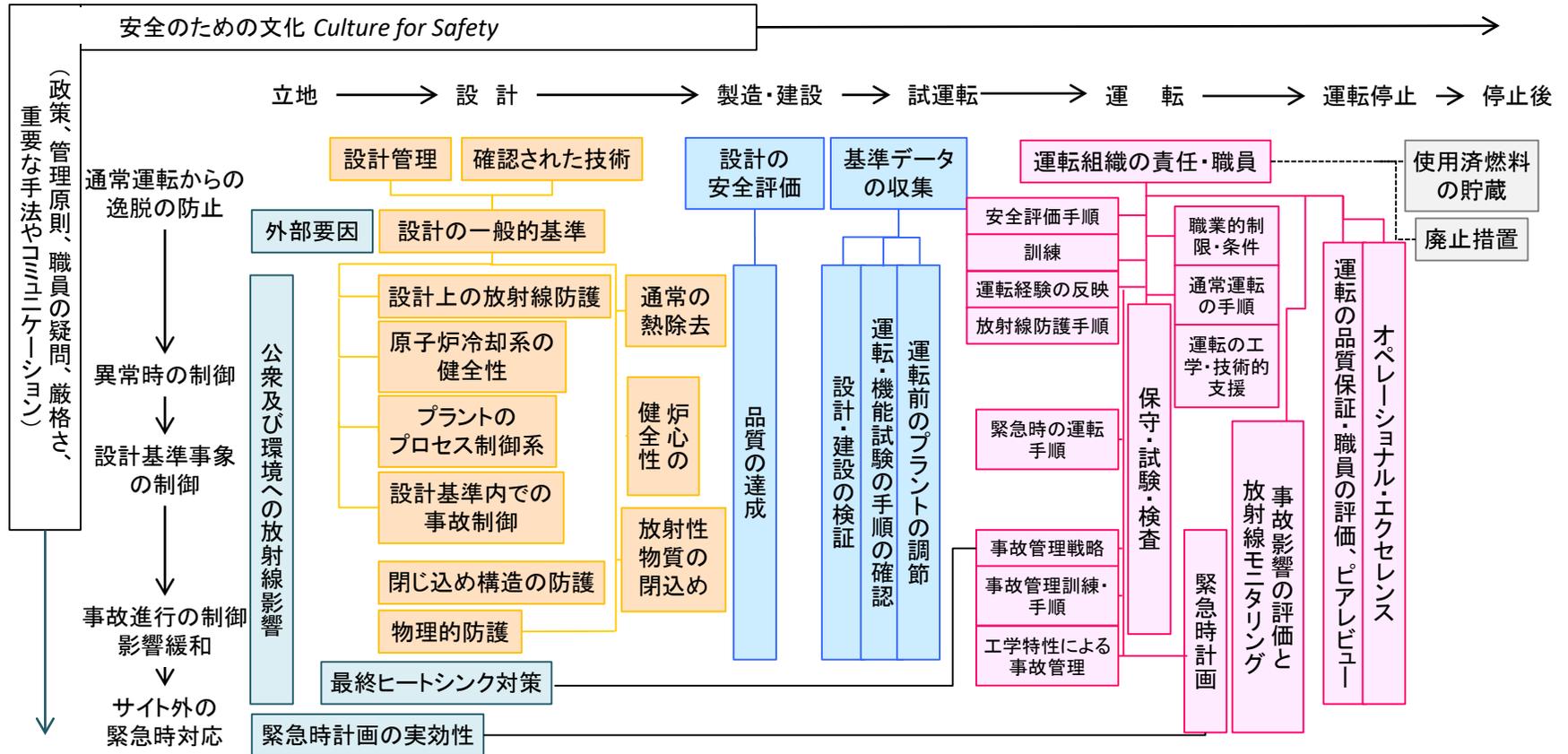
「福島第一原子力発電所に関するセミナー」報告書
—何が悪かったのか、今後何をなすべきか—

(2013年3月発行。現在、部会HPよりダウンロード可)

- 学会事故調査委員会の報告書・提言の基盤
- その後の部会活動の基盤
- 原子力学会春・秋企画セッション、フォローアップセミナー
- 夏期セミナー、幹事会、学会誌

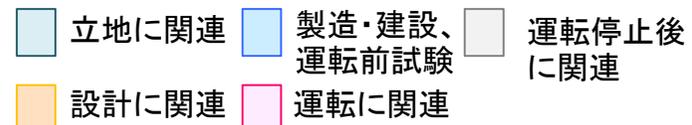
原子力発電プラントのライフサイクルに渡る安全

深層防護の観点から



IAEA INSAG による

・安全のための文化はライフサイクルを通じた全活動に関連している



安全な長期運転の要素

技術・マネジメント・情報基盤の観点から

■ *Plant Life Management*

- プラントシステムの
合理的・経済的な長期運用

■ *Safe Long Term Operation*

- 安全な長期間運転を確保
する規制・規格・品質保証体系

■ *Ageing Management*

- 広範で複雑な劣化事象
の把握と管理

* 上記を総合的に扱う我が国の「高経年化対策」に対応した英語はない。

原子力発電プラントの長期間安全運転に対し、 学協会（と学協会規格）が果たしてきた役割

- 複雑なシステムとしての原子力施設の保守管理・保全、品質マネジメントシステム、組織文化、継続的な改善と
そのための意思決定の在り方
- （内外の運転経験ではカバーしきれない）不確実性を
マネジメントするための、技術情報基盤と研究開発に
関する長期的なプラットフォーム構築
 - ✓ オブソレッセンス・マネジメントを含む
- （機器の）健全性評価手法、（材料の）経年劣化評価手
法、（非破壊）検査手法の高度化
 - ✓ これらに基づく、リスク情報の効果的な活用と外的事象の重
畳に伴う健全性評価やEQを含む

原子力安全規制における境界条件の変化と課題

- 新規制基準と適合性審査
 - バックフィット制度を含む
- 検査制度の運用
 - リスク・インフォームド、パフォーマンスベース
 - チェックリスト方式ではない
 - 規制検査(重要度評価、PI-R検査を含む)
 - 定期事業者検査、使用前事業者検査 CAP、CM
- 安全性向上評価届出制度の運用改善(FSAR、PSR他)
- 高経年化技術評価・運転期間延長認可制度に代わり、「長期施設管理計画」の認可制度へ
 - 40年目の特別点検、60年度の追加点検

高経年化対策の「定義」

高経年化対策実施基準 (AESJ-SC-P005:2008) による

- 高経年化対策は、原子力発電所の構築物、系統及び機器に想定される経年劣化事象に対して、長期間の供用を考慮した保守管理に係る活動を行うこと
 - ① 運転初期からの経年劣化管理
 - ② 10年ごとの経年劣化管理
 - ③ 高経年化対策検討(高経年化技術評価、長期保全計画の策定、及び技術開発課題の抽出)
 - ④ 長期保全計画に基づく保守管理

原子力発電所における経年劣化の特徴

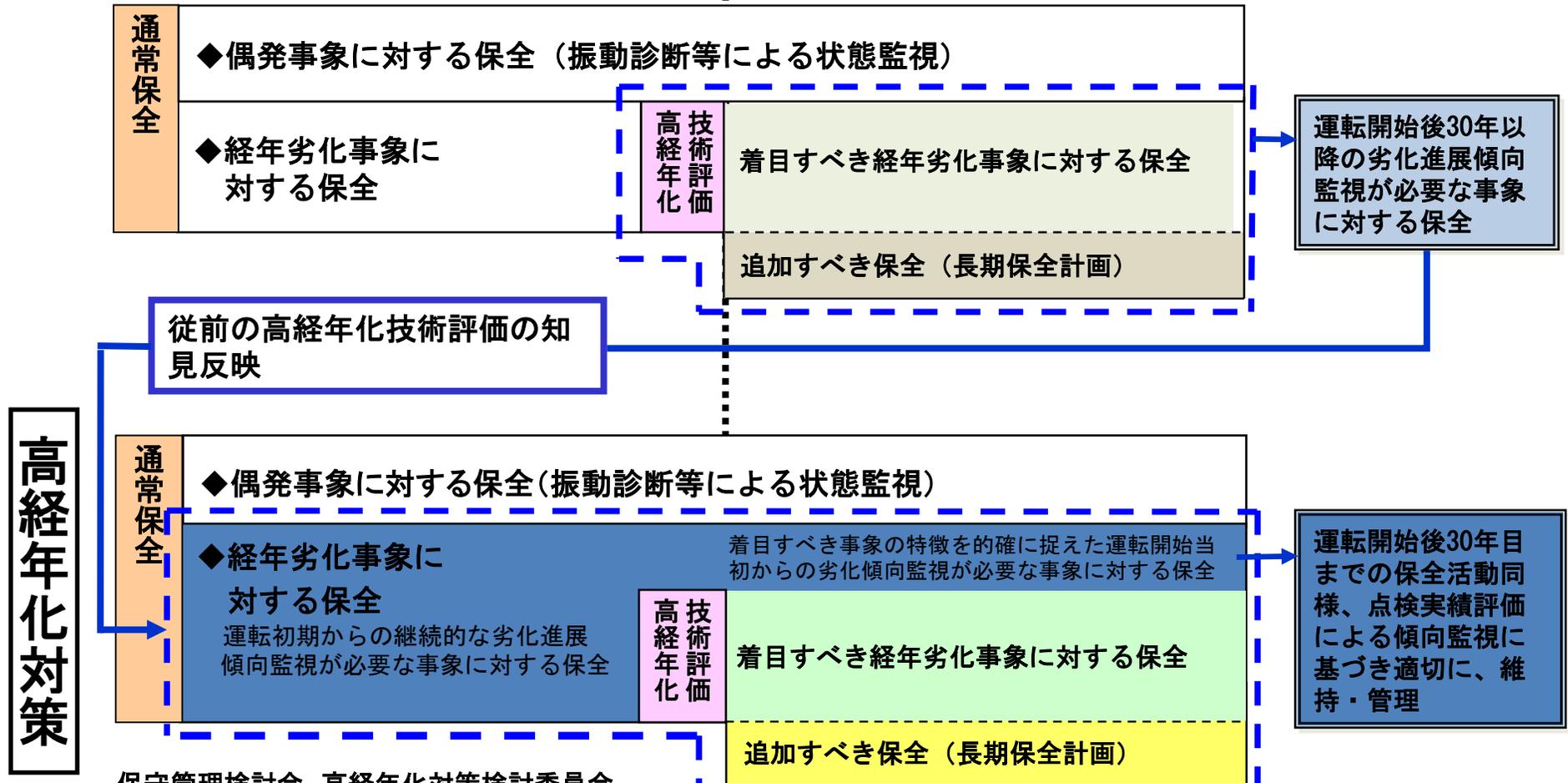
経年劣化事象ごとの劣化形態とその時間的変化の特性に応じて保全を行うことが重要

経年劣化の種類と時間的変化の特徴	形状変化	材質変化	その他
運転開始から比較的早い時期	配管の減肉	—	(計測器の特性変化)
運転開始から比較的長い時期	照射誘起応力腐食割れ (IASCC)	原子炉容器の中性子照射脆化	—
運転開始から長い時期	疲労による割れ	コンクリートの強度低下	ケーブルの絶縁低下

JEAC4209及びPLM標準に基づいた 原子力発電プラントの保守管理

【プラント運転期間】

(30年目)



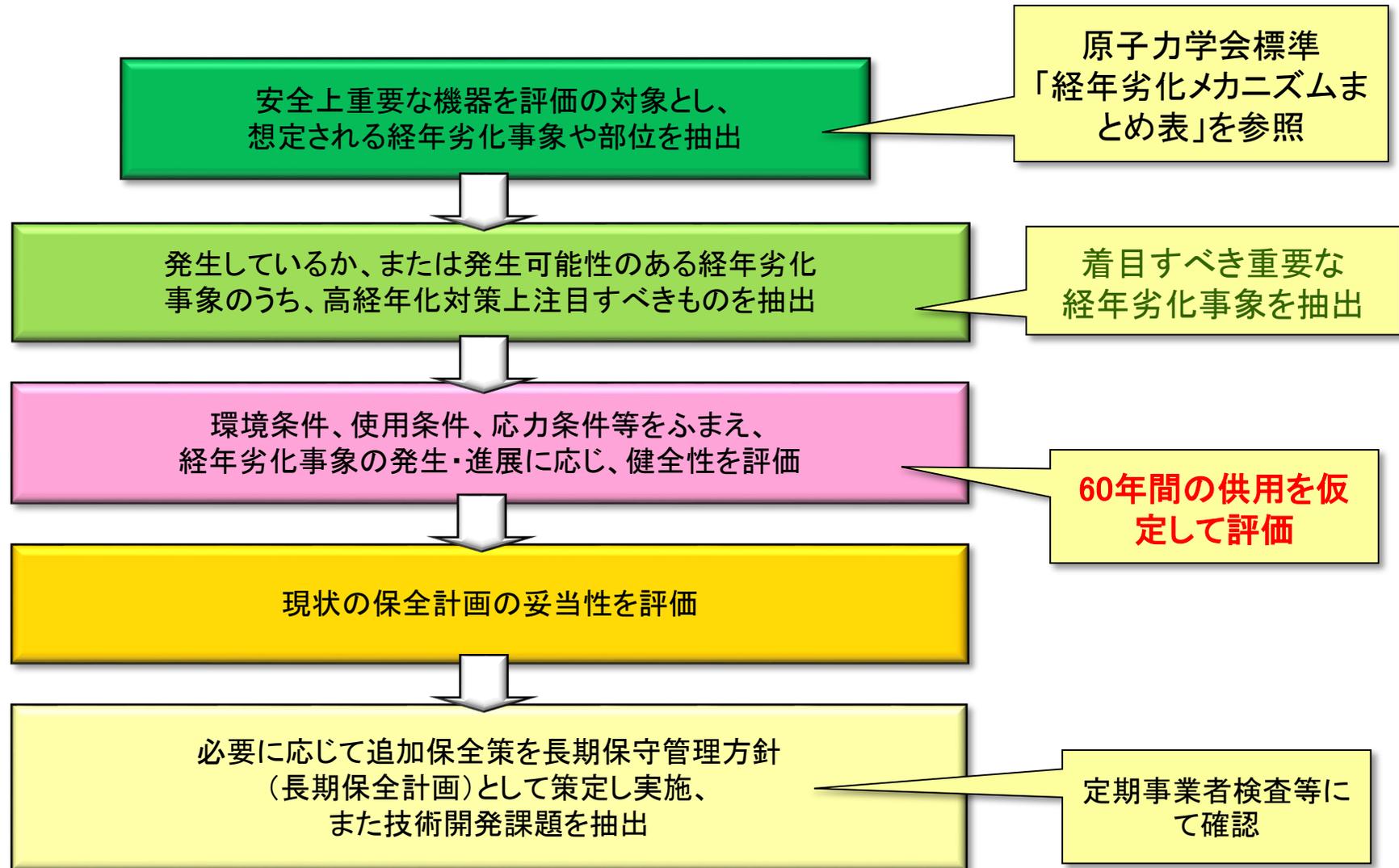
保守管理検討会、高経年化対策検討委員会
合同会議資料より(2007.10.5 電気事業連合会)

経年劣化事象の抽出とスクリーニング

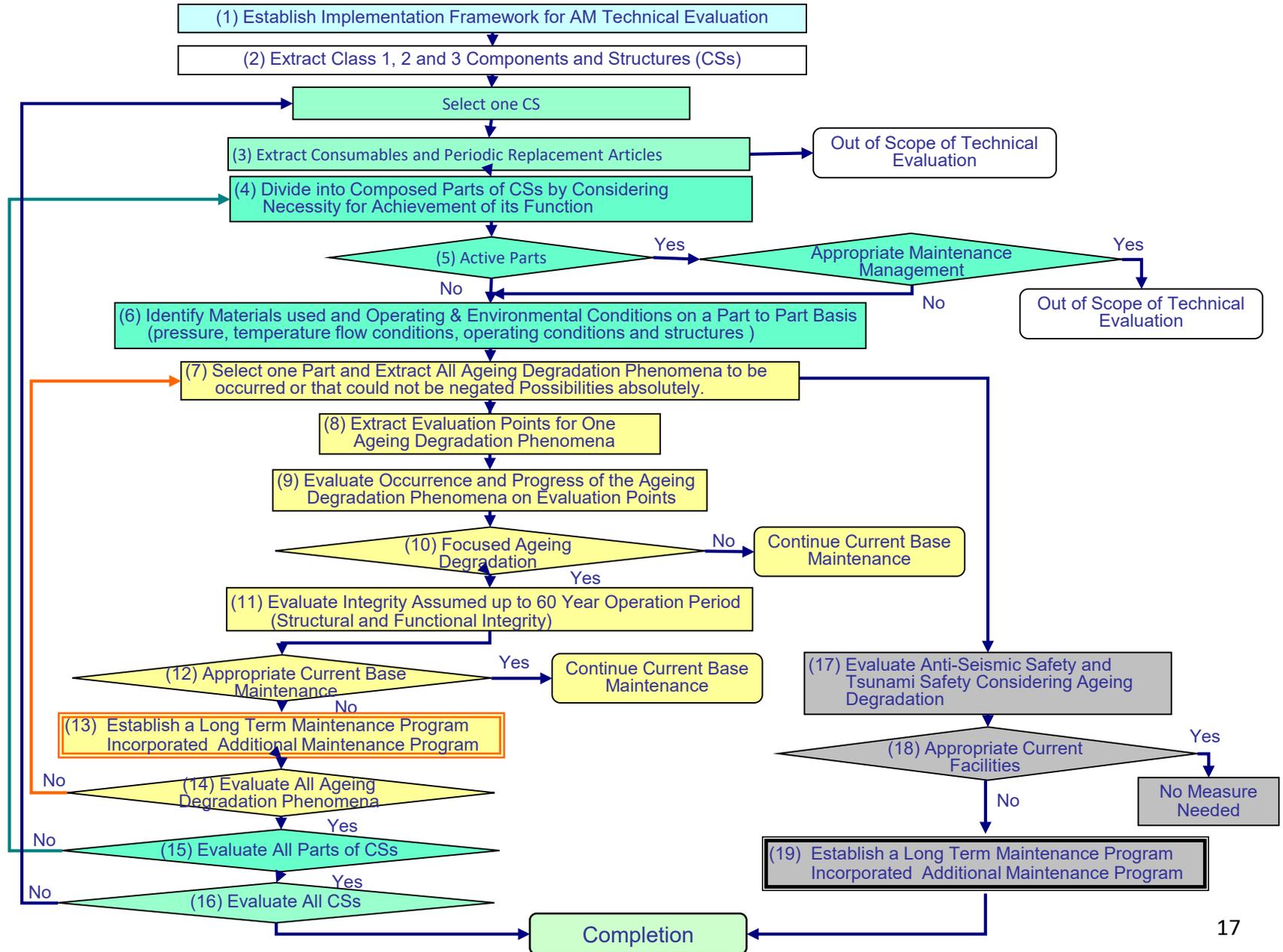
高経年化対策実施基準 (AESJ-SC-P005:2008) による

1. 工業用材料に想定される経年劣化事象を網羅的に調べ、この中で特に原子炉施設が置かれている環境条件を考慮して想定される経年劣化事象を抽出する。
2. 材料ごとにその置かれる環境条件を考慮し、発生が予測される経年劣化事象を抽出する。
3. 高経年化技術評価に取り込むべき経年劣化事象と対象となる機器と部位のセットを「経年劣化メカニズムまとめ表」として整理する。

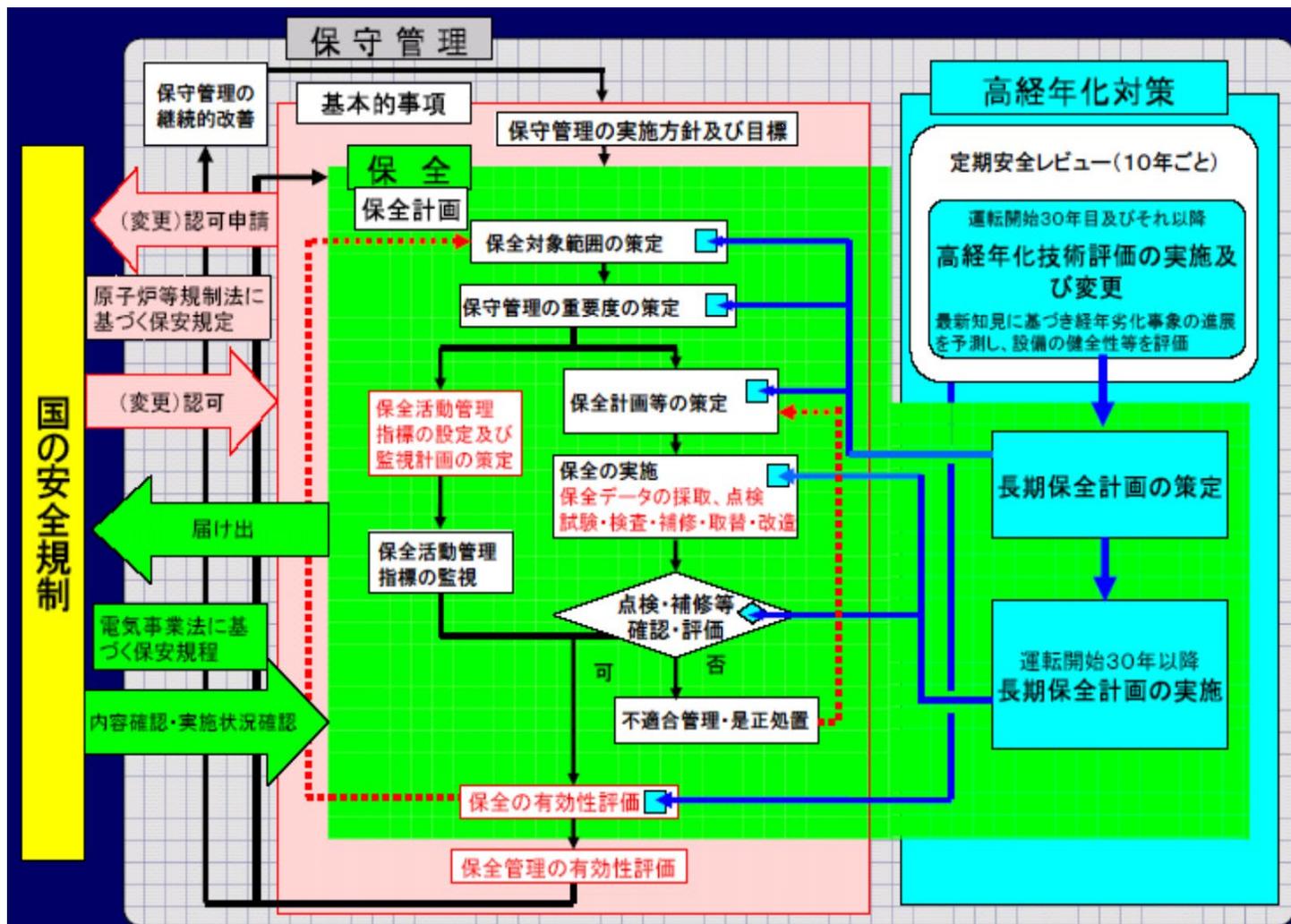
高経年化技術評価の概略フロー



高経年化技術評価のフロー



(これまでの)高経年化技術評価と保守管理の関係性



保守管理は品質マネジメントシステムが適用される

40年目以降の高経年化技術評価

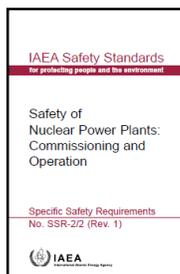
- 2回目の高経年化技術評価においては、以下の（品質マネジメントシステムの）観点から、30年目以降の事故トラブル等を広く抽出し、改善を検討する規制プラクティスが組み込まれていた。
 - ✓ 想定される部位や経年劣化事象の抽出に課題がなかったか。
 - ✓ 高経年化対策上着目すべき経年劣化事象が適切に抽出されていたか。
 - ✓ 機器健全性評価法に課題がなかったか。
 - ✓ 現行の保守管理に課題がなかったか。

IAEAにおける安全基準の体系

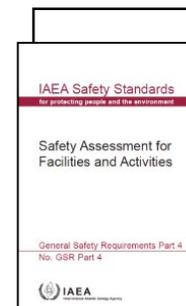
SAFETY REQUIREMENTS



SSR-2/1
Safety of NPPs:
Design

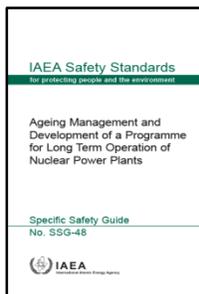


SSR-2/2
Safety of NPPs:
Commissioning
and Operation

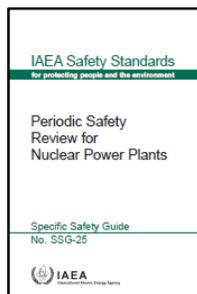


GSR part 2
Leadership and
Management for
Safety
GSR part 4
Safety assessment for
facilities and
activities

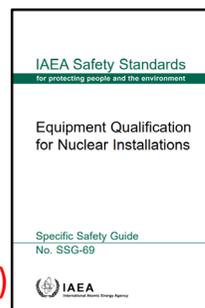
SAFETY GUIDES



SSG-48
Ageing
Management
and LTO
(2018)



SSG-25
PSR
(2013)
SSG-69
EQ (2021)

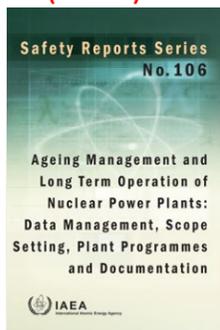


Other important Safety Guides:

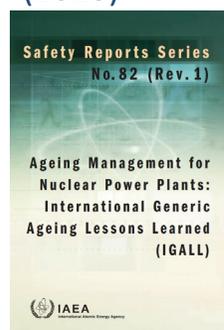
- GS-G-3.1 Application of Management System...
- NS-G-2.3 Modifications to NPPs
- NS-G-2.6 Maintenance, Surveillance and ISI
- SSG-13 Chemistry Programme...

SAFETY REPORTS

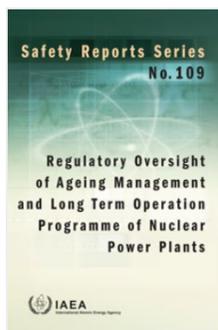
SRS 106
Scoping
(2022)



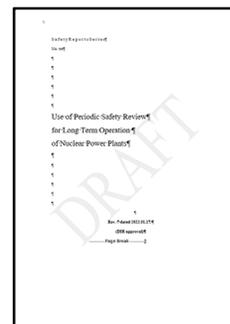
SRS 82
IGALL, Rev.1
(2020)



SRS 109
Regulatory
Oversight (2022)



SRS XXX
PSR support
for LTO



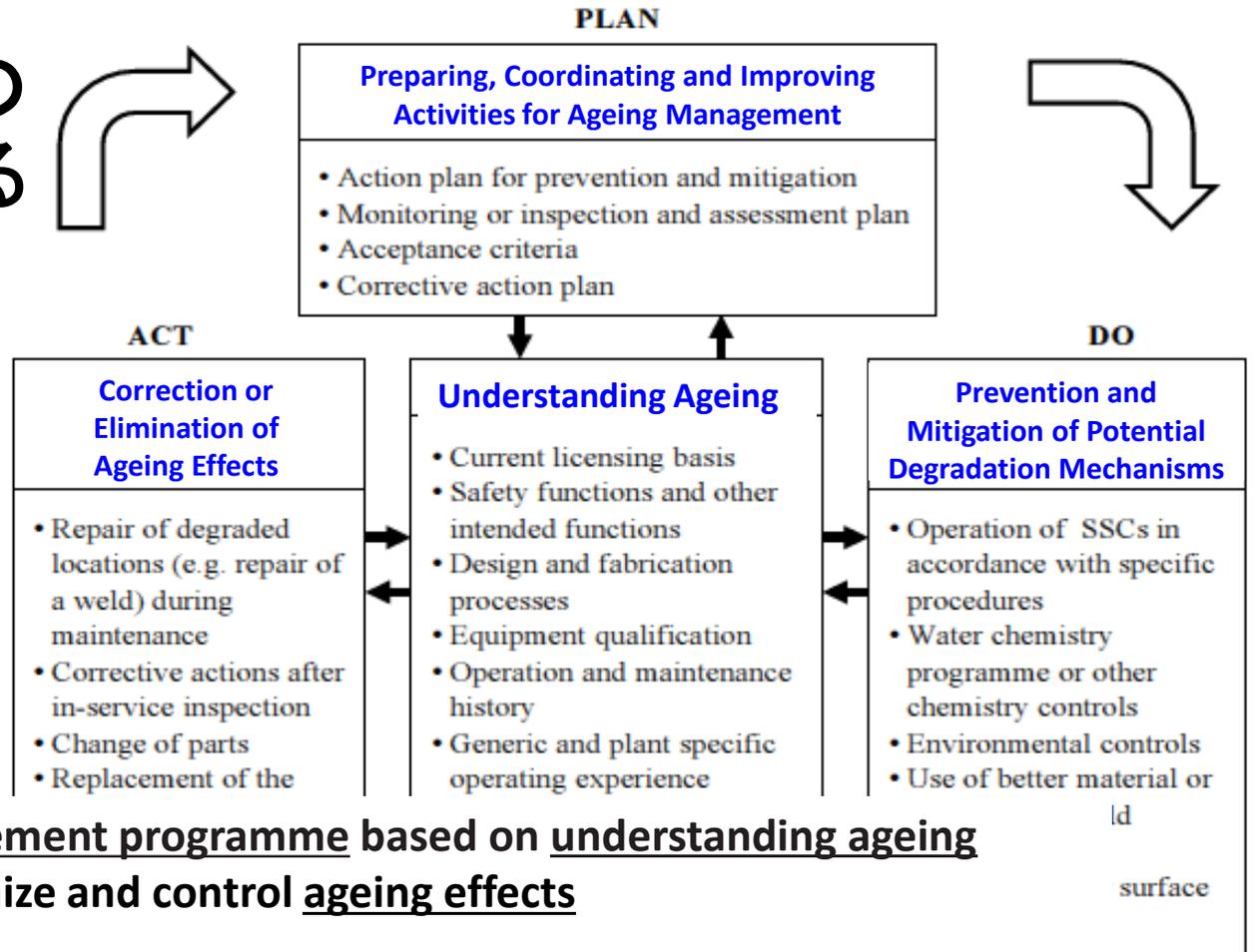
Other important guidelines:

- Component specific AM guidelines
- Programmatic AM guidelines
- Guidelines on integrity of RPV & effective life management
- Guidelines on PSR, CM, DBDR

原子炉機器と構造物の 経年劣化管理に対する 体系的アプローチ

IAEA SSG-48 (2018)

効果的な経年劣化管理のための
9要素 (attributes) を提示

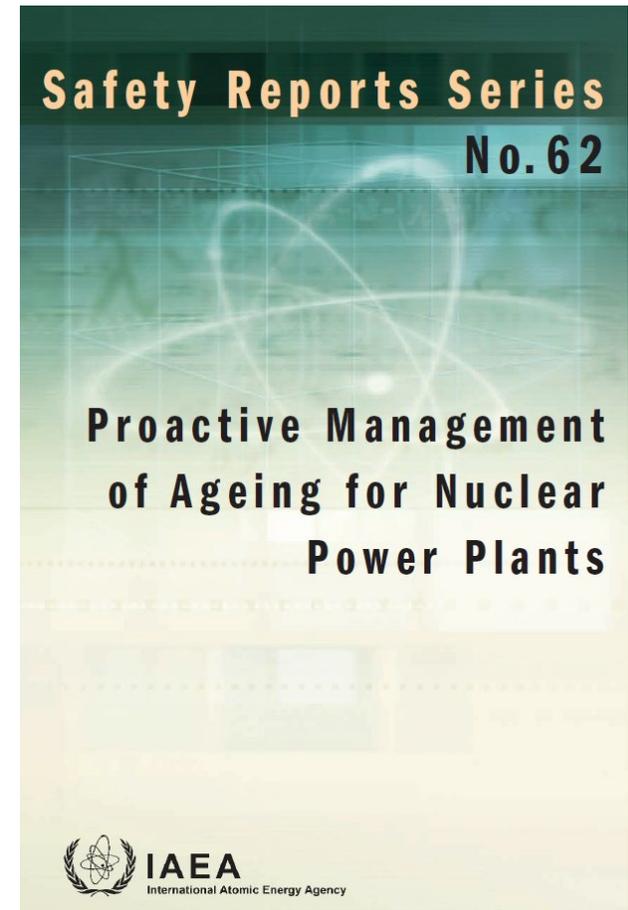


1. Scope of the ageing management programme based on understanding ageing
2. Preventive actions to minimize and control ageing effects
3. Detection of ageing effects
4. Monitoring and trending of ageing effects
5. Mitigation of ageing effects
6. Acceptance criteria
7. Corrective actions
8. Operating experience feedback and feedback of research and development results
9. Quality management

経年劣化管理において共通する弱点

IAEA SRS 62 (2009)より

- *Insufficient understanding or predictability of ageing*
- *Lack of data for ageing management*
- *Inadequate communication and coordination*
- *Inadequate safety culture*
- *Error induced ageing*
- *Inappropriate use of reactive ageing management*
- *Insufficient capability for dealing with unforeseen ageing phenomena*



PSR: 定期安全レビュー

IAEA SSG-25 (2013)*、PSR+標準 (AESJ-SC-P005:2008)

- ✓ PSRにおける14の安全因子は独立ではない
- ✓ 事業者自らが総合的評定を行う意義が大きい

安全因子間の相互関連性マトリックス

SSG-25 (2013), Table 1より

SF1: プラントシステム設計

SF2: 安全上重要な構造・システム・機器の状況

SF3: 設備の適格性

SF4: 経年劣化

SF5: 決定論的安全評価

SF6: 確率論的安全評価

SF7: ハザード分析

SF8: 安全実績

SF9: 他のプラント・研究からの経験の利用

SF10: 組織・マネジメントシステム・安全文化

SF11: 手順書

SF12: 人的要因

SF13: 緊急時計画

SF14: 環境への放射性物質の影響

		Safety factors providing input													
		SF1	SF2	SF3	SF4	SF5	SF6	SF7	SF8	SF9	SF10	SF11	SF12	SF13	SF14
Safety factors receiving input	SF 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	SF 2	X		X	X	X			X	X	X				
	SF 3	X	X		X	X	X	X	X	X	X			X	
	SF 4	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X			
	SF 5	X	X	X	X		X		X	X		X	X	X	
	SF 6	X	X	X	X	X		X	X	X		X	X	X	
	SF 7	X	X	X		X	X		X	X		X	X	X	X
	SF 8	X	X			X	X	X		X	X	X	X		X
	SF 9	X									X	X			X
	SF 10		X			X	X		X	X		X	X		X
	SF 11	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
	SF 12	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
	SF 13	X				X	X	X	X	X		X			
	SF 14	X	X				X		X	X		X			

* 現在、SSG-25の改訂作業が進行中

PSR(定期安全レビュー)における安全因子の評価

独立ではない14の安全因子の影響度合いの評価法

中野 玲、東京大学工学部システム創成学科卒業論文(2021.2)
「原子力システムのレジリエンス向上のための安全因子定量評価」による

DEMATEL法*

- 影響を及ぼし合う要素間の**直接影響と間接影響の和**をとる手法。
 $X = (x_{ij})$ を j 列から i 行への要素間影響度を成分に持つ n 次
正方行列とする。 X を正規化した Y に対し、

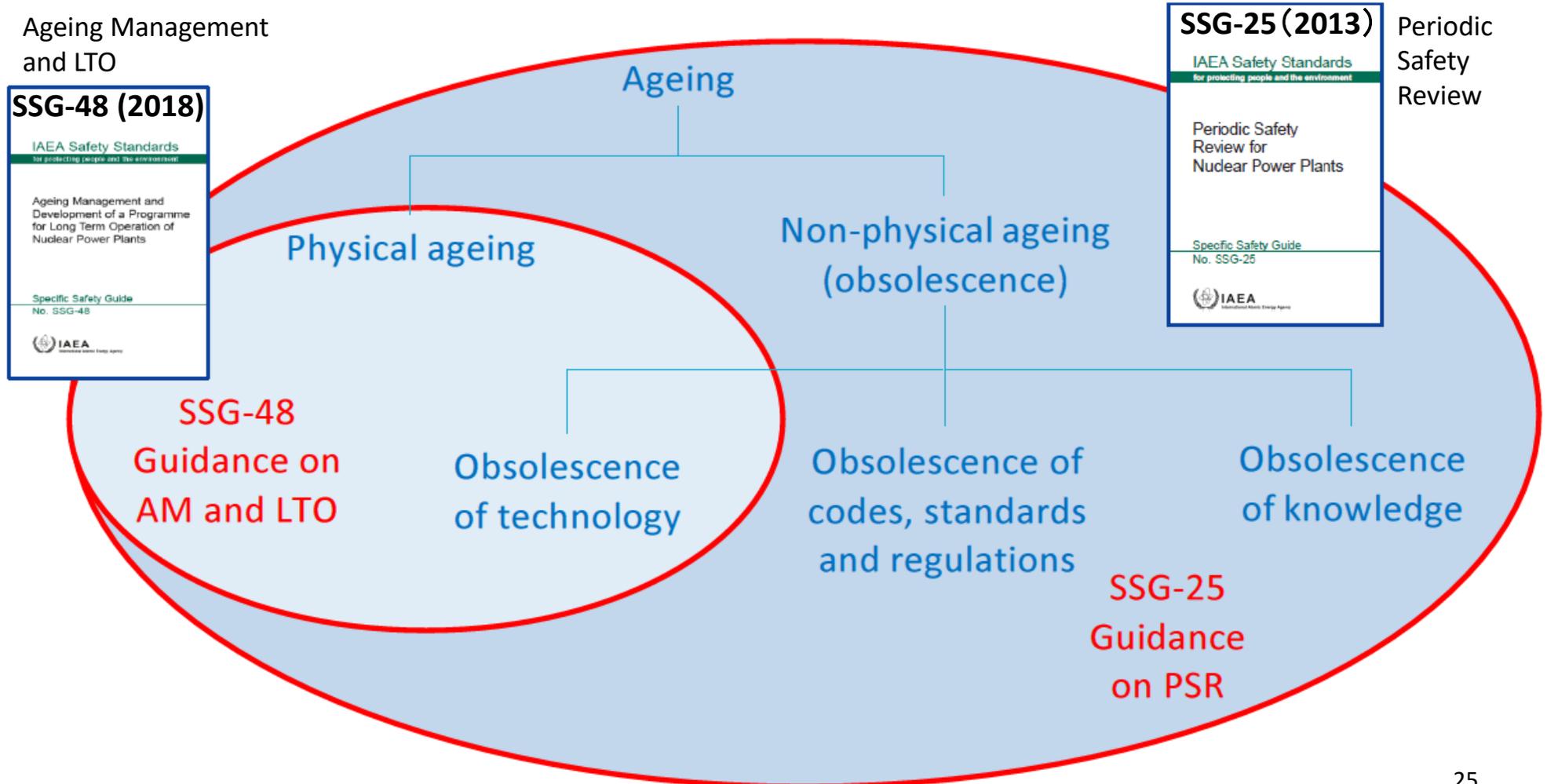
$$Y + Y^2 + Y^3 + \dots + Y^p + \dots = Y(I - Y)^{-1}$$

は、直接影響と間接影響を全て足した**総合影響行列**となる。

- $Y(I - Y)^{-1}$ の列和は、その列の要素が他の要素に与える**最終的な影響度**を表す。

* A. Gabus, E. Fontela, *World Problems, An Invitation to Further Thought within
The Framework of DEMATEL*, Battelle Geneva Research Centre (1972).

IAEA SSG-48 (2018)とSSG-25 (2013)における Obsolescence



国際的な知識ベース構築と国際連携の場

IGALL : International Ageing Lessons Learned (SRS 82)

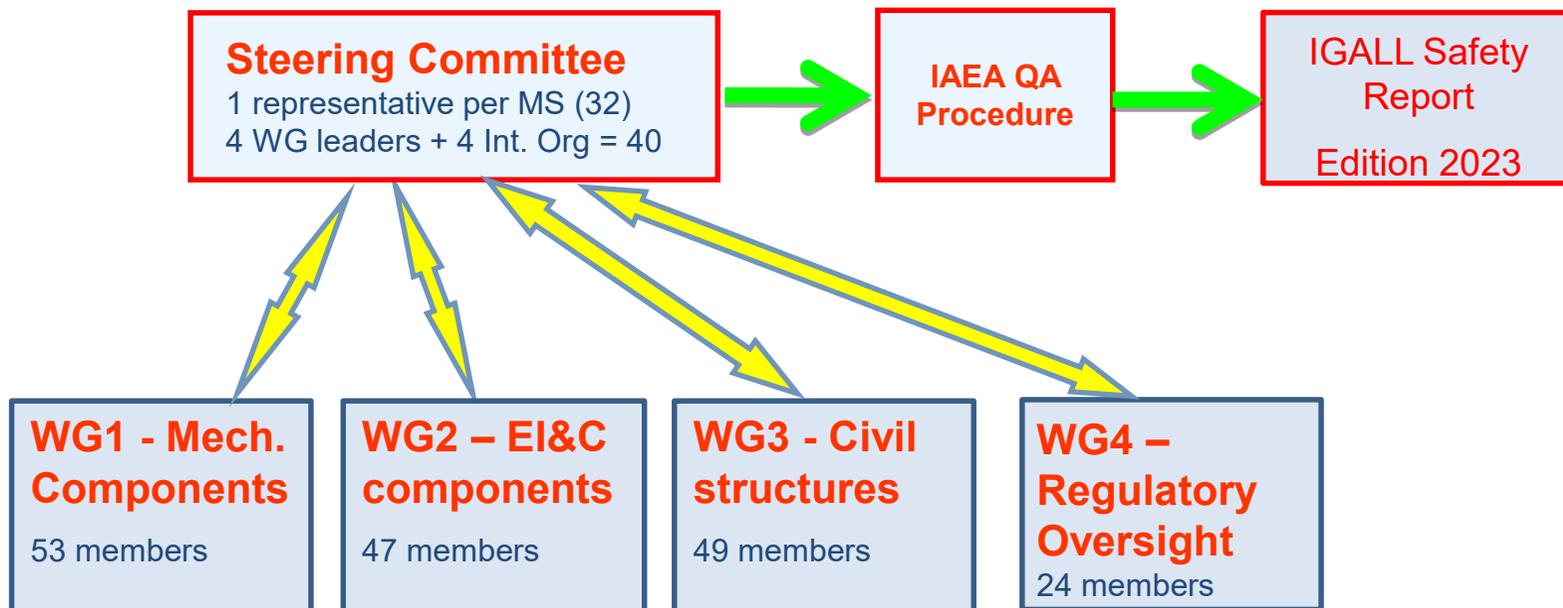
- 原子力学会PLM標準(英語版)と米国 GALL (NUREG-1801)が主要インプット
: IGALLは、active componentsも含む
- Phases 1-4 (2010 – 2019)を経て、現在 Phase 5-6
(PWR, BWR, WWER, CANDU/PHWR)
 - ✓ Ageing Management Programmes (AMPs) : diverse LWR technologies
 - ✓ Time Limited Ageing Analysis (TLAAs) : proven AMPs and TLAAs
 - ✓ Technological Obsolescence Program (TOP)

SSG-48の効果的な経年劣化管理の9要素(attributes)を具体的に提示

1. Scope of the ageing management programme based on understanding ageing
2. Preventive actions to minimize and control ageing effects
3. Detection of ageing effects
4. Monitoring and trending of ageing effects
5. Mitigation of ageing effects
6. Acceptance criteria
7. Corrective actions
8. Operating experience feedback and feedback of research and development results
9. Quality management

国際的な知識ベース構築と国際連携の場

IGALL : International Ageing Lessons Learned (SRS 82)



IGALL public web site

<http://gnsn.iaea.org/NSNI/PoS/IGALL/SitePages/Home.aspx>

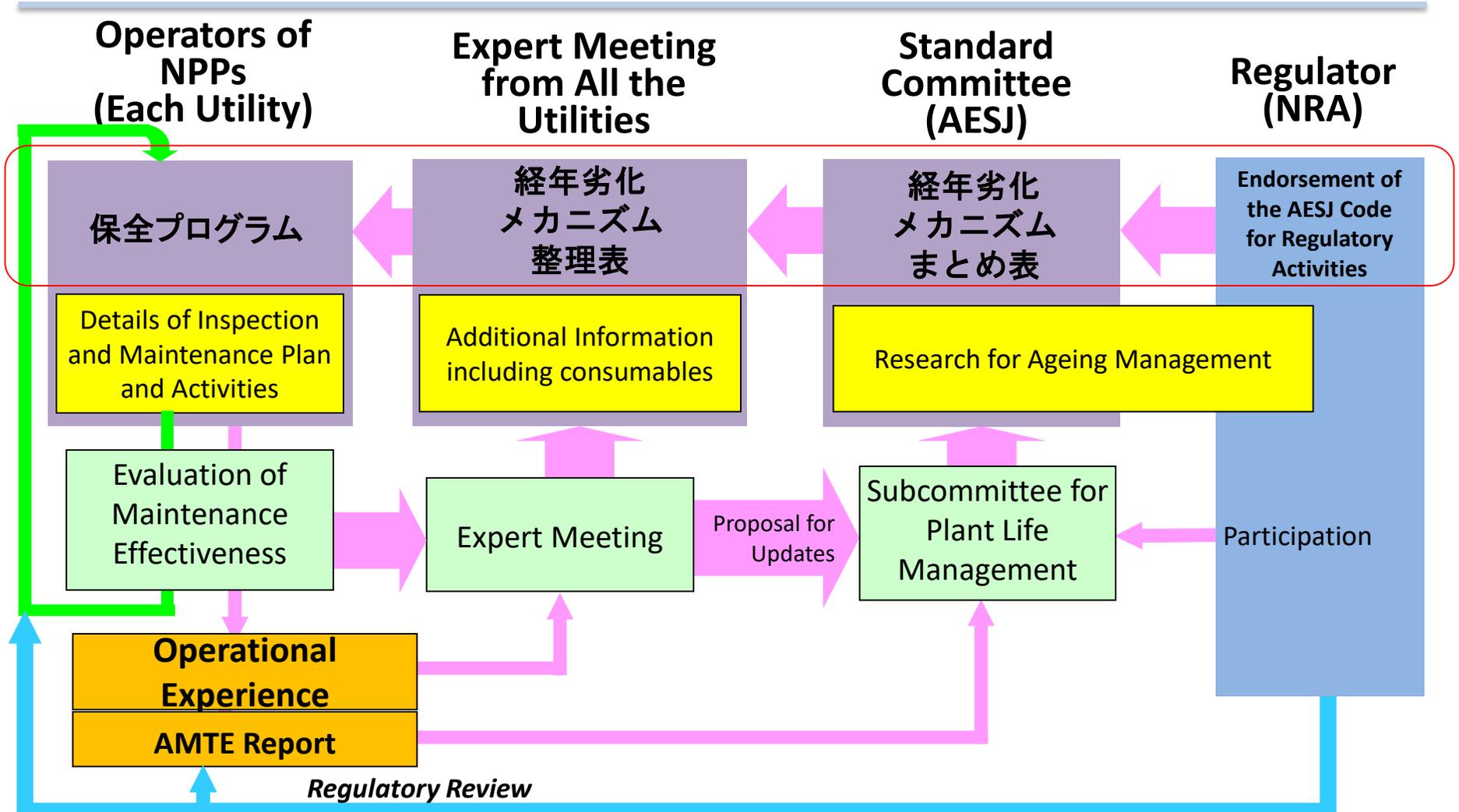
- AMP, TLAA, TOP

IGALL restricted web site

<https://gnsn.iaea.org/sites/auth/NSNI/ExtPRJ/IGALL/DB/SitePages/Home.aspx>

- **IGALL AMR master table** (including MS contributions)

国内における経年劣化管理に関する PLM標準に基づいた継続的な改善の流れ

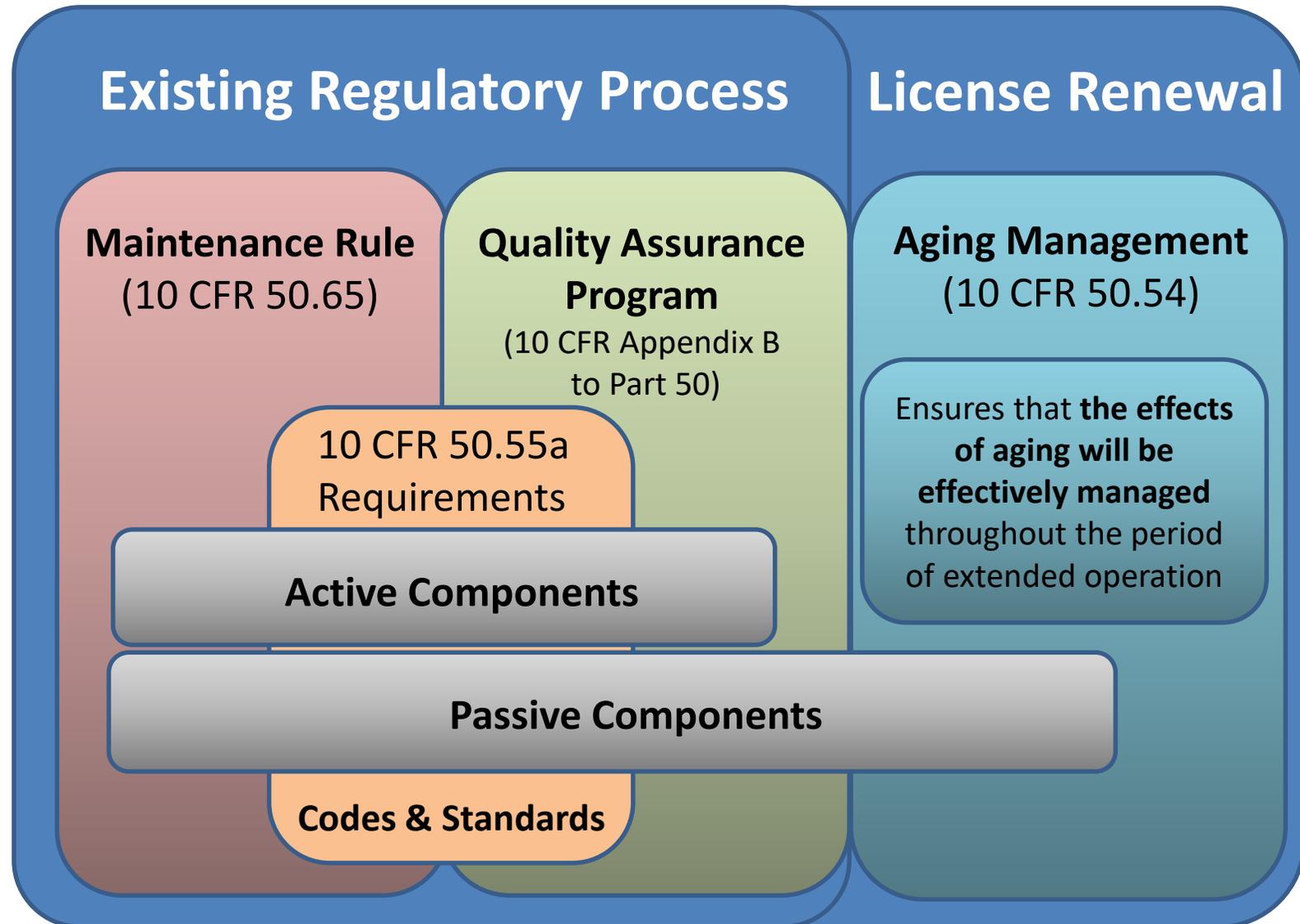


AMTE : Ageing Management Technical Evaluation (高経年化技術評価)

JANSI : Japan Nuclear Safety Institute,

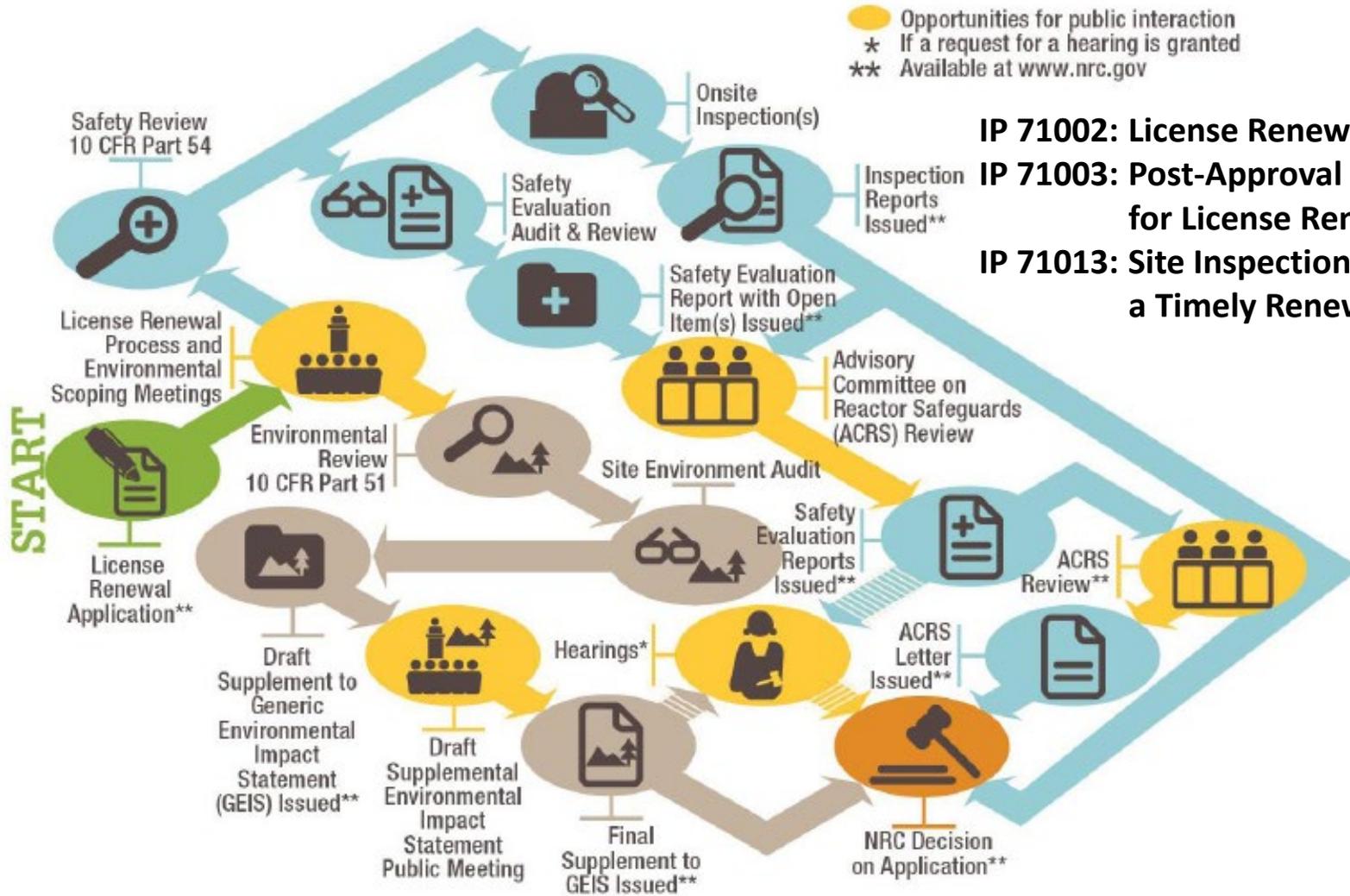
AESJ : Atomic Energy Society of Japan

米国の運転免許更新の対象



米国の運転免許更新における審査と検査プロセス

License Renewal Process



IP 71002: License Renewal Inspection
IP 71003: Post-Approval Site Inspection for License Renewal
IP 71013: Site Inspection for Plants with a Timely Renewal Application

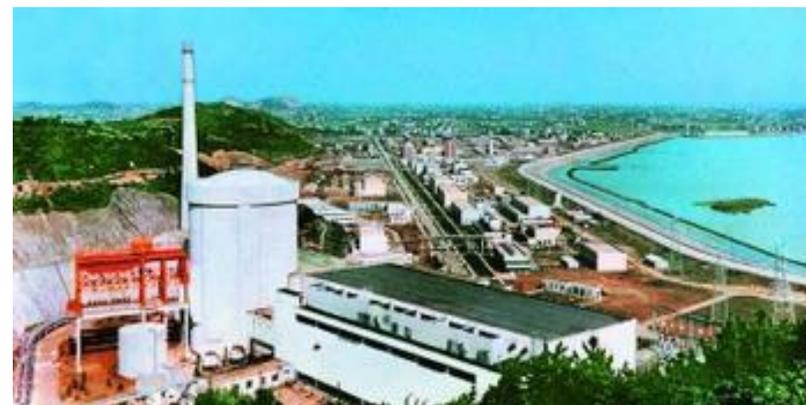
中国における運転期間延長(1/3)

The main points of OLE Technical Policy:

- The OLE application should be submitted by the licensee **5 years before** the expiry of operating license.
- Maximum **20 years extension** of operating license.
- Review of OLE application will **be based on the license basis when approved** for operation **plus supplemental safety requirements** during operation, such as supplemental safety requirements after Fukushima accident.
- The application should be submitted along with a series of technical demonstration reports on:
 - Integrated plant assessment (**IPA**) report with a series of supporting materials such as **AMR** reports, **TCAA** reports, safety assessment reports for SSCs refurbishment, etc..
 - Addendum of **environmental impact** assessment report.
 - Addendum and **revised FSAR**.

中国における運転期間延長(2/3)

- Qinshan-1, a 320 MWe PWR designed by SNERDI and started operation in 1991, is the first NPP unit in mainland of China.
- The design life of Qinshan-1 is 30 years. Its original operating license expired in 2021. Activities on Operating License Extension (OLE) have been carried out in the past several years.
- In 2016, China Nuclear Safety Regulatory, NNSA, issued **OLE Technical Policy**, as regulatory guidance for OLE activities.



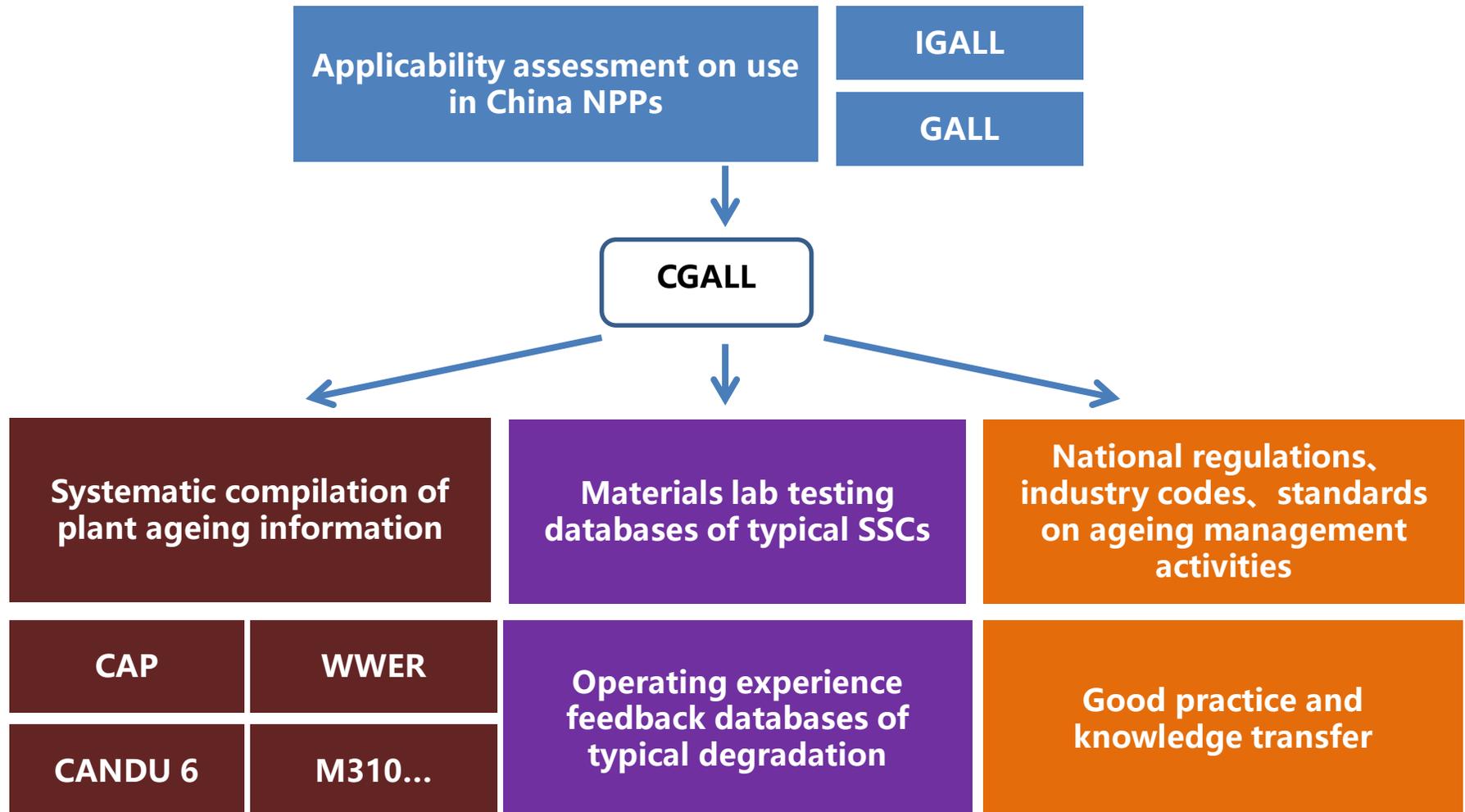
Qinshan-1



Qinshan NPP Base with 9 units,
PWR: 1x320 MWe, 4x650 MWe, 2x1089 MWe, PHWR (CANDU): 2x728 MWe.
Realizing nuclear power heating for residents nearby by the end of 2021.

中国における運転期間延長(3/3)

Establishment of Chinese Generic Ageing Lessons Learnt -CGALL



まとめと今後の課題(1)

- 中長期的な観点からの技術情報基盤整備と産官学等ステークホルダの参画
- 潜在的な事象への具体的な取り組みの在り方
- 高経年化対策へのリスク情報を活用
(検査制度との関係強化)
- 長期間に渡る継続的な安全研究(と人材確保)

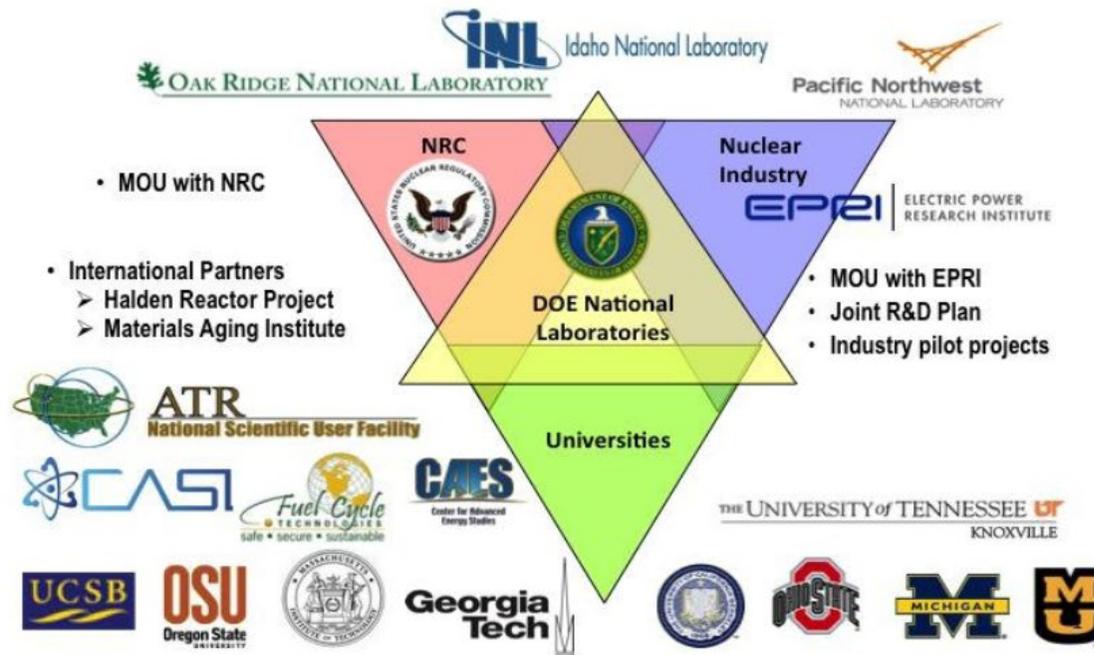
まとめと今後の課題(2)

- 安全に横串をさす活動
- 潜在的事象への取り組み
- これらのリスク情報基盤への統合
- 長期間に渡る継続的で統合的な安全研究
ロードマップ

まとめと今後の課題

DOE LWRS and EPRI LTO Activities

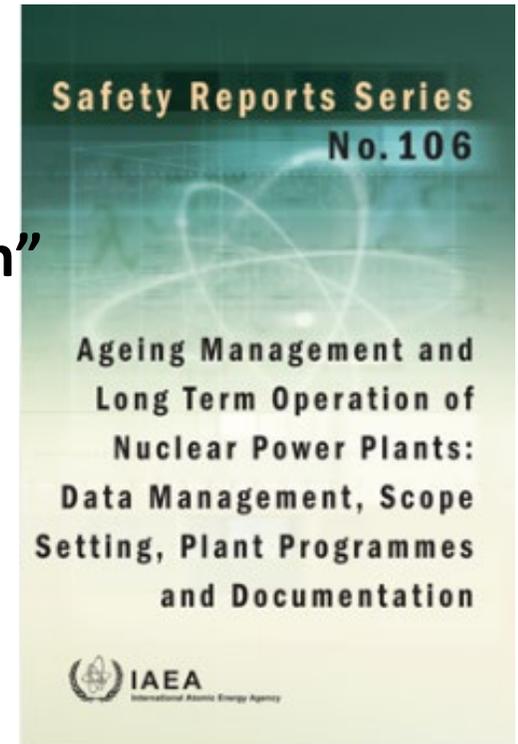
- Materials Aging and Degradation
- Instrumentation, Information and Control System Technologies
- Risk Informed Safety Margin Characterization
- Advanced Light Water Reactor Nuclear Fuels



SRS 106 (2022)

“Ageing Management and Long Term Operation of Nuclear Power Plants: Data Management, Scope Setting, Review of Plant Programmes, Documentation”

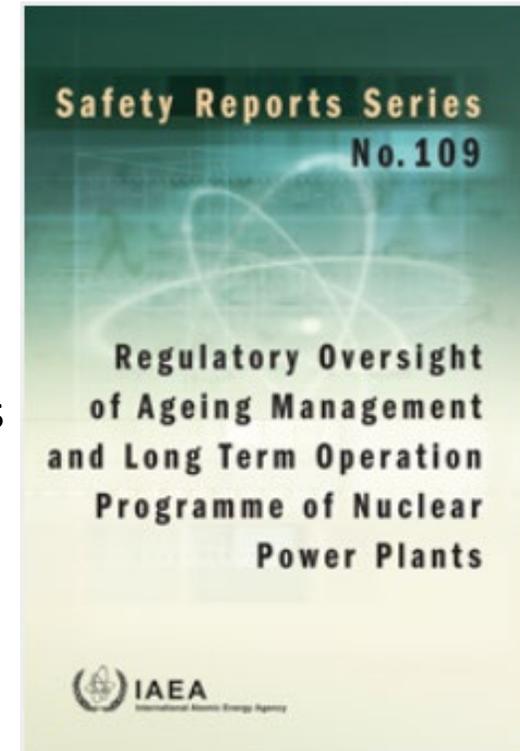
- **Scope setting**
 - Application of scope setting criteria
 - Consistency check
 - Commodity groups
- **Review of plant programme**
 - Information on each programme (maintenance, etc.)
- **Documentation of ageing management**
 - Each step of ageing management



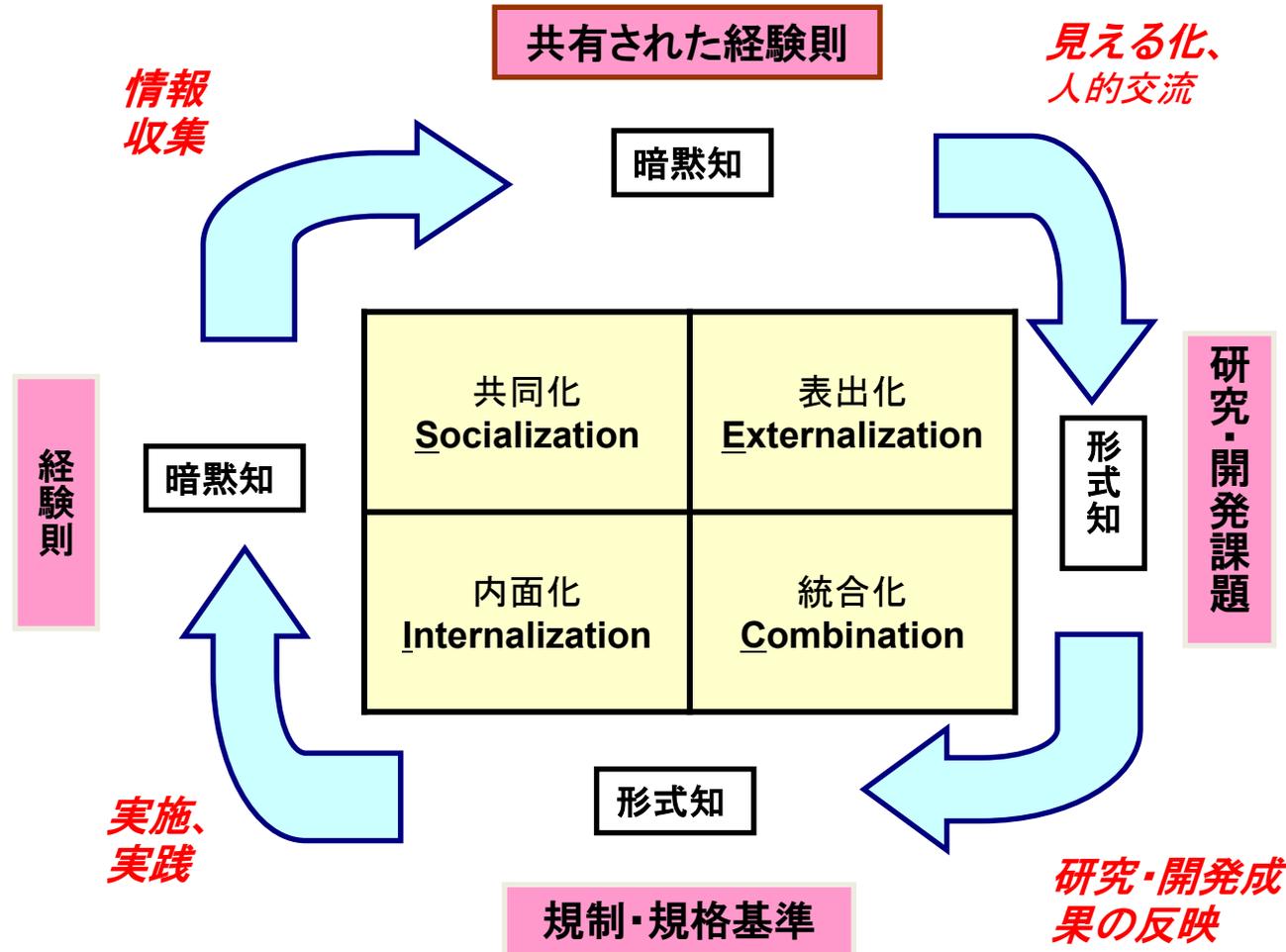
SRS 109 (2022)

“Regulatory Oversight of Ageing Management and Long Term Operation Programme of Nuclear Power Plants”

- **Legal framework for AM and LTO**
- **Requirements**
 - On preconditions (safety improvements)
 - LTO authorization process
 - FSAR update, configuration management, modifications for LTO, design basis documentation, record keeping
 - Plant programmes
 - AM organization, AMPs, AMR, TLAAs, Obsolescence
 - PSR
- **Preparation for LTO authorization**
 - Development of requirements and internal processes



原子力安全の高度化における知識創造プロセス と高経年化対策の基盤



SECIモデル:
野中郁次郎(一橋大学)

「知識創造のプロセスは、ふたつの知(形式知、暗黙知)が四つの段階を螺旋状に上って発展をする」

四つの段階

共同化

身体・五感を駆使、直接経験を通じた暗黙知の共有、創出

表出化

対話・思慮による概念、デザインの創造(暗黙知の形式知化)

統合化

形式知の組み合わせによる新たな知識の創造(情報の活用)

内面化

形式知を行動・実践のレベルで伝達、新たな暗黙知として理解・学習