

原子力の将来課題に向けた 技術・人材政策について

平成30年3月6日
資源エネルギー庁

I . 原子力技術・人材に関する問題意識	 p2
II . 我が国の原子力技術・人材を巡る課題	 p4
(i) 原子力人材の減少	
(ii) 研究開発機能の低下	
(iii) サプライチェーンの劣化	
(iv) 核不拡散・原子力安全における期待の高まり	
III . 世界の原子力技術を巡る動向	 p12
(i) 大型軽水炉の安全性・経済性向上	
(ii) 第4世代炉(ナトリウム冷却高速炉)の開発	
(iii) 多様な社会ニーズに対応するイノベーション促進	
IV . 技術・人材の課題解決に向けた論点	 p18

I . 原子力技術・人材に関する問題意識	 p2
II . 我が国の原子力技術・人材を巡る課題	 p4
(i) 原子力人材の減少	
(ii) 研究開発機能の低下	
(iii) サプライチェーンの劣化	
(iv) 核不拡散・原子力安全における期待の高まり	
III . 世界の原子力技術を巡る動向	 p12
(i) 大型軽水炉の安全性・経済性向上	
(ii) 第4世代炉(ナトリウム冷却高速炉)の開発	
(iii) 多様な社会ニーズに対応するイノベーション促進	
IV . 技術・人材の課題解決に向けた論点	 p18

原子力技術・人材に関する問題意識

- 我が国は**原子力の不断の安全性向上**や**廃炉の着実な実施**、**国際貢献**等、各課題に直面。
- それらの解決には、**技術・人材・サプライチェーンの維持**等にも適切な対策を講じる必要。

◇今後我が国が直面する課題

1. 原子力の不断の安全性向上

- ・ 新規制基準は世界で最も厳しい水準に
- ・ 更なる安全性向上に向けた技術開発

2. 廃炉の着実な実施

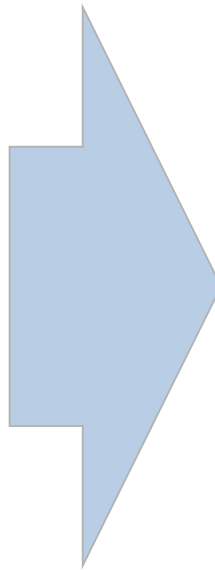
- ・ 今後既設炉の廃炉が増加
- ・ 安全かつ効率的な廃炉の実施
- ・ 福島第一原発の廃炉の着実な実施

3. 核燃料サイクルの着実な実施

- ・ 軽水炉関連技術に加えて、高速炉・再処理等に特有の技術・人材が必要

4. 核不拡散・安全面での国際貢献

- ・ アジアを中心に世界で原子力利用が拡大
- ・ 核不拡散や原子力の安全利用における、我が国への期待が増加



◇課題解決のために必要な対策

①原子力関連技術・人材の維持

- ・ 運転・保守・廃炉等、安全を支える様々な技術・人材の長期的な維持・発展が必要
- ・ 特に若手人材には、原子力の意義や重要性の提示が必要

②研究開発機能の維持・充実

- ・ 研究開発の進展が必要な分野が多数存在
- ・ 研究基盤を充実させ、イノベーションを促進する必要

③サプライチェーンの維持・強化

- ・ 安全かつ効率的な原子力利用のため、国内外の需要を捉えつつ、裾野の広いサプライチェーンの維持・強化が必要

④世界に通用する技術水準の確保

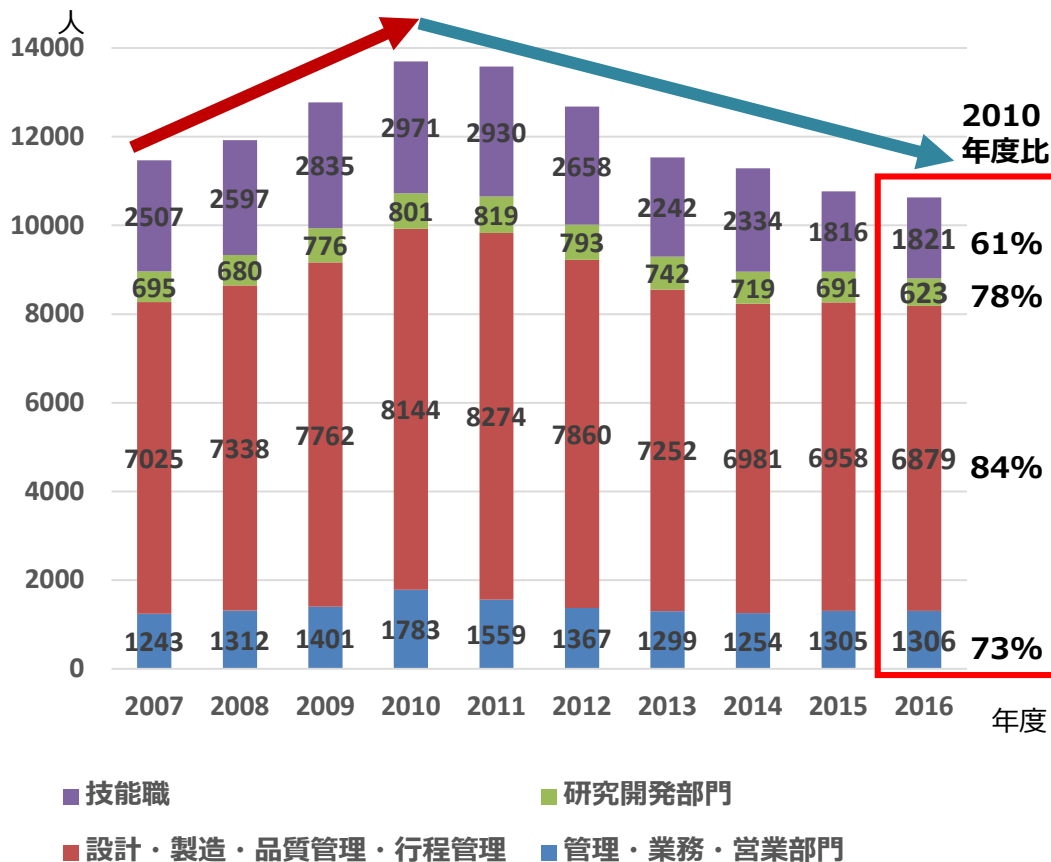
- ・ 国際貢献や海外プロジェクトを通じて世界の先端知識を吸収し、自国の技術・人材を強化する好循環の実現が必要

I .	原子力技術・人材に関する問題意識・・・・・・・・	p2
II .	我が国の原子力技術・人材を巡る課題・・・・	p4
	(i)	原子力人材の減少
	(ii)	研究開発機能の低下
	(iii)	サプライチェーンの劣化
	(iv)	核不拡散・原子力安全における期待の高まり
III .	世界の原子力技術を巡る動向・・・・・・・・	p12
	(i)	大型軽水炉の安全性・経済性向上
	(ii)	第4世代炉(ナトリウム冷却高速炉)の開発
	(iii)	多様な社会ニーズに対応するイノベーション促進
IV .	技術・人材の課題解決に向けた論点・・・・・・・・	p18

(i) 原子力人材の減少：原子力従事者数の減少

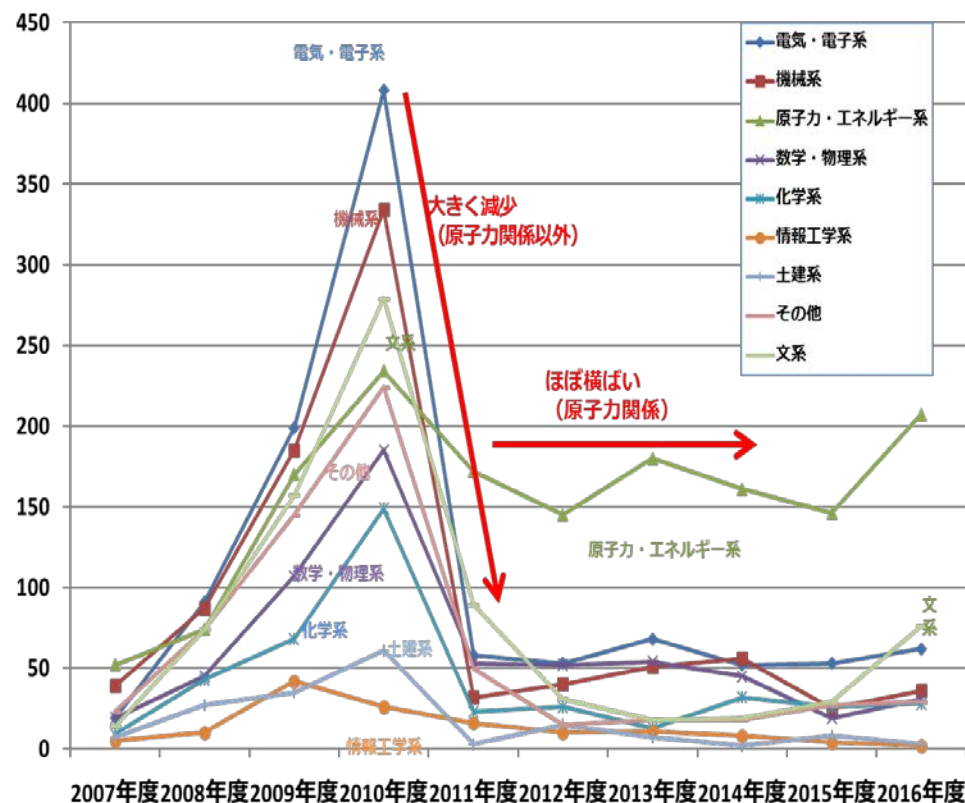
- メーカーにおいて、原子力関連業務に従事する従業員数は、**震災前は上昇傾向**にあったが、**震災以降は減少傾向**。
- 原子力関連企業の就職説明会に参加する**原子力系の学生はほぼ横ばい**であるが、**非原子力系の学生は大きく減少**しており、原子力に対して関心を持つ学生数の減少が懸念。

＜直近10年の各部門の原子力従事者数＞



(出典) 日本電機工業会資料を元に作成

＜原産協 就職説明会の専攻別参加人数＞

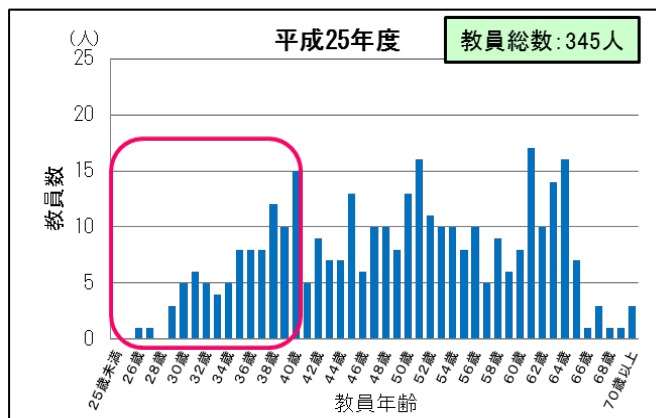
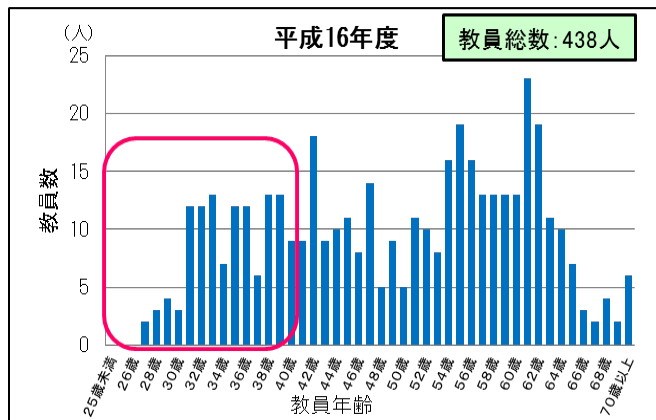


(出典) 日本原子力産業協会

(ii) 研究開発機能の低下：原子力関連の教員や学生の減少

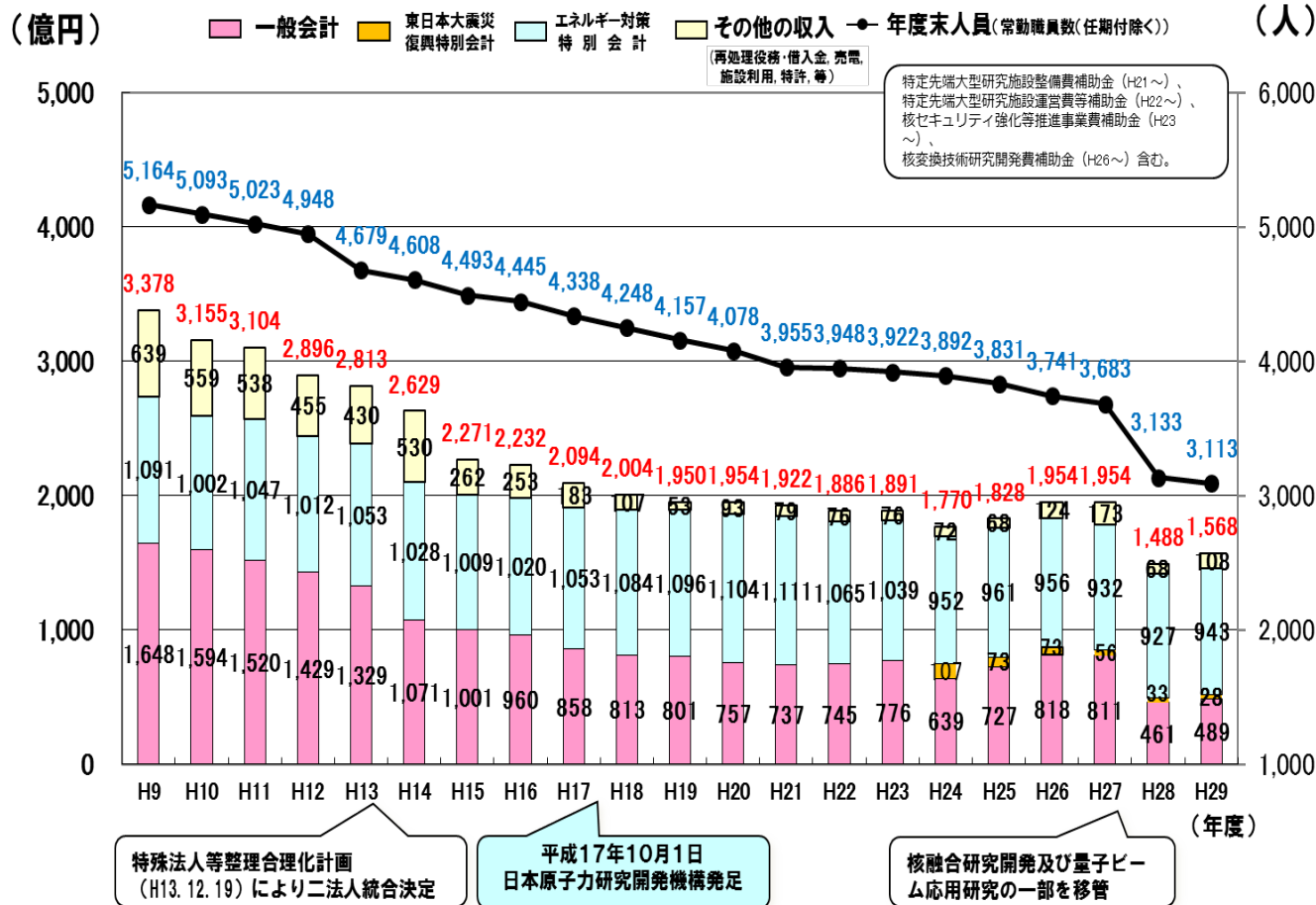
- 大学における原子力関連の教員、特に若年層が減少し、年齢層が高齢化。
- 国立研究開発法人として、我が国の原子力分野の研究開発を担うJAEA（日本原子力研究開発機構）の人員・予算は、共に減少傾向。

＜原子力関連教員数と年齢層の推移＞



(出典) 日本原子力産業協会

＜JAEAの予算と人員数の推移＞

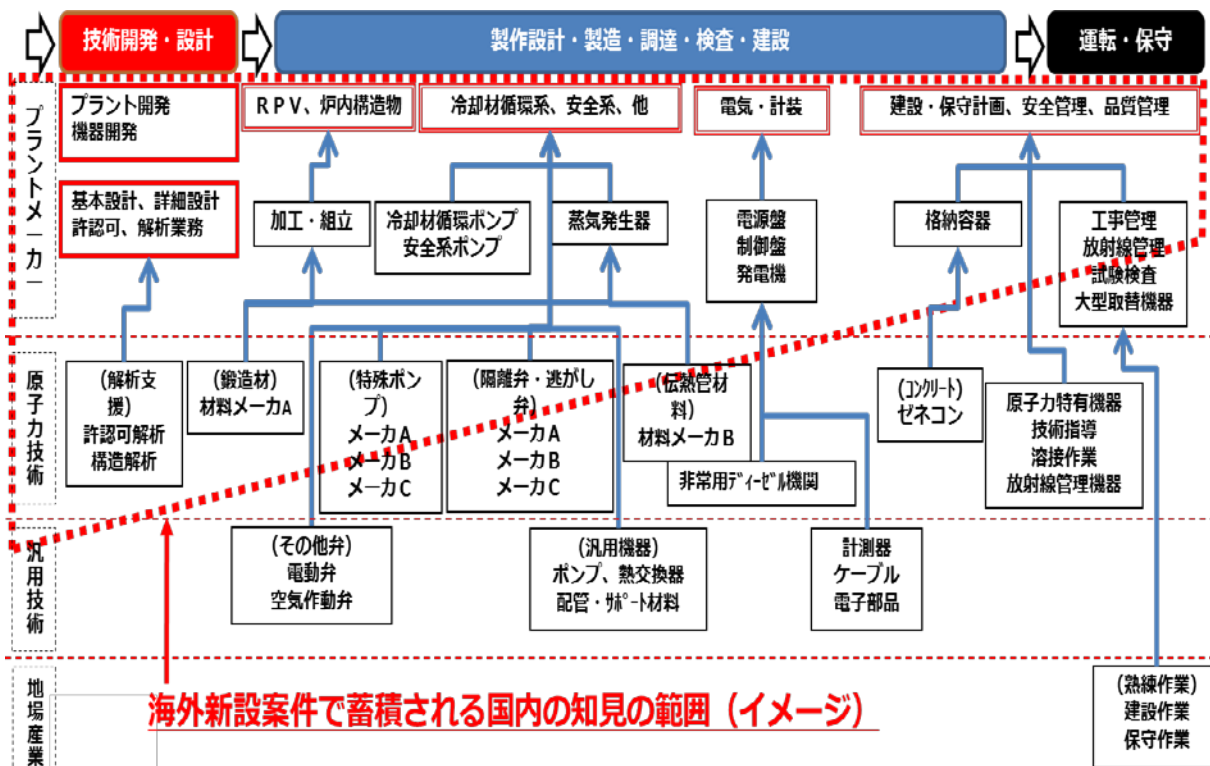


(出典) 日本原子力研究開発機構 6

(iii) サプライチェーンの劣化：原子力の産業構造と基盤維持

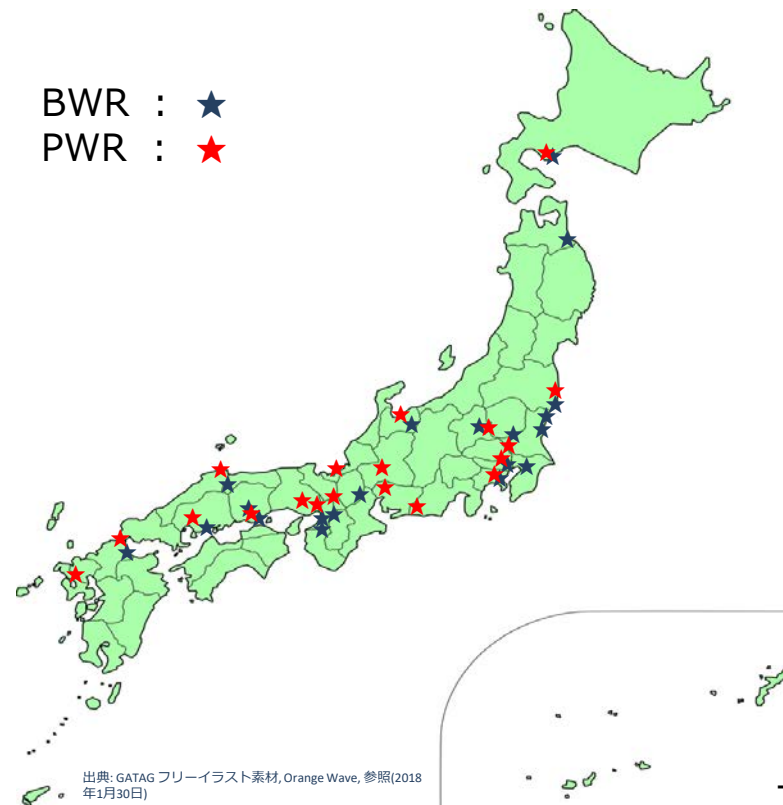
- 我が国には、原子力発電の**サプライチェーン**が存在。原子力プラントメーカーを中心に、原子力特有の技術基盤を持つ材料メーカーや機器製造メーカー、ゼネコンや発電所周辺の地場産業等、**裾野の広い産業**によって支えられている。
- 国内の原子力発電所の安全運転を確保していくためにも、**国内原発の再稼働や、海外のプラント建設への関与等**の取組を通じて、これまで蓄積してきた**技術・人材、競争力ある部品産業の拡がり**を**維持**していくことが重要。

＜原子力発電のサプライチェーン＞



＜BWRおよびPWRの主なサプライヤーマップ＞

BWR : ★
PWR : ★



(出典) 日本電気機械工業会資料を元に作成

出典: GATAG フリーイラスト素材, Orange Wave, 参照(2018年1月30日)
<http://free-illustrations.gatag.net/2014/04/24/080000.html>

(iii) サプライチェーンの劣化：各国の原子力産業が直面している課題

- 米・英・仏では、原発建設の期間が空き、**自国内のサプライチェーンが衰退**。
- 特に、米国では、1979年のTMI事故以降、原子力プラントの新規建設停滞により原子力産業が衰退し、**主要資機材の製造を日本など海外企業に依存**。また、**労働力の高齢化も大きな課題**。
- 我が国においても、一部の**サプライチェーンが撤退**し、海外調達を余儀なくされるリスクもある。

○主な原子力利用国の直近の新規原発建設着工年

	米国	英国	フランス
直近の運転開始年	1996年※	1995年	2002年
直近の着工開始年	2013年	2017年	2007年

※ワッツバー2号機は除く（1973年に建設を開始した後1985年に工事を一時中断し、22年の中断期間を経て2007年から工事を再開し2016年に運転開始したため）

（出典）「世界の原子力発電開発の動向2017年版」（2017年1月1日時点）、その他公表情報

○米国の原子力技術・人材の状況

- ✓ 1979年の**スリーマイル島事故以降**、米国機械学会が認証する原子力規格取得企業が**600社（1980年）→200社以下（2007年）**まで減少。
- ✓ 米国エネルギー省は、2005年、米国の原子力産業に関し以下の評価を行っている。
 - **米国企業には、第三世代原子炉の主要資機材（原子炉圧力容器、蒸気発生器等）を製造する能力はない**。例えば、原子炉圧力容器に用いる品質の高い**大型鍛造品は唯一日本製鋼（JSW）のみが製造可能**。
 - こうした製造能力の欠如が、（国内の原発建設において）**重大な建設遅延リスクやファイナンスリスクをもたらす**。
- ✓ **労働力の高齢化が大きな課題**。例えば、フロリダ電力は、発電所勤務者の40%は今後5年間で退職する可能性がある。

（出典）German Federal Ministry of Environment, Nature Conservation and Reactor Safety "The World Nuclear Industry Status Report 2009 With Particular Emphasis on Economic Issues," August 2009, The Center for International Governance Innovation "The US Nuclear Industry: Current Status and Prospects under the Obama Administration" November 2009

○我が国のメーカー撤退事例（ヒアリング結果）

A社：耐放射線カメラ

B社：電気配線部品（原子炉格納容器用）

C社：制御盤タッチパネル用部品

D社：加圧器用部品

(iv) 核不拡散・原子力安全における国際的な取組

- 日本はこれまでIAEAと連携して**核不拡散・原子力安全分野**において国際的な取組を進めてきた。

取組

【核不拡散】

- 1999年に原子力発電を行っている国として初めてIAEAの追加議定書を締結。
- 追加議定書に基づき原子力活動に係る申告を行い、補完的アクセスを多数受入れ。

【原子力安全】

- 2013年、福島第一原発事故の教訓やIAEAの安全基準等を踏まえた新たな規制基準を導入。
- IAEAによる規制評価や各原発の運転安全に関するレビューを受入れ。
- IAEAに対する拠出金や人的支援（専門家派遣及び研修員受け入れ等）を通じて、原発新規導入国の基盤整備や人材育成等を実施。

評価・実績

2003年の活動に対する評価以降、これまで毎年、IAEAより「国内すべての核物質が平和的な活動にとどまっている」との結論。
(IAEA保障措置実施報告書)

独立した透明性のある規制機関の設置や事故の教訓の規制枠組みへの反映について評価されるとともに、IAEAからの勧告・提言を踏まえ、必要な措置を講じるなど不断の改善に取り組んでいる。
(2016年IAEA総合規制評価サービス)

2015年の東電柏崎刈羽原発に対するIAEA運転時安全レビューで指摘された15点のうち、8点が問題解決、残りも改善経過良好と評価。
(2017年フォローアップミッション)

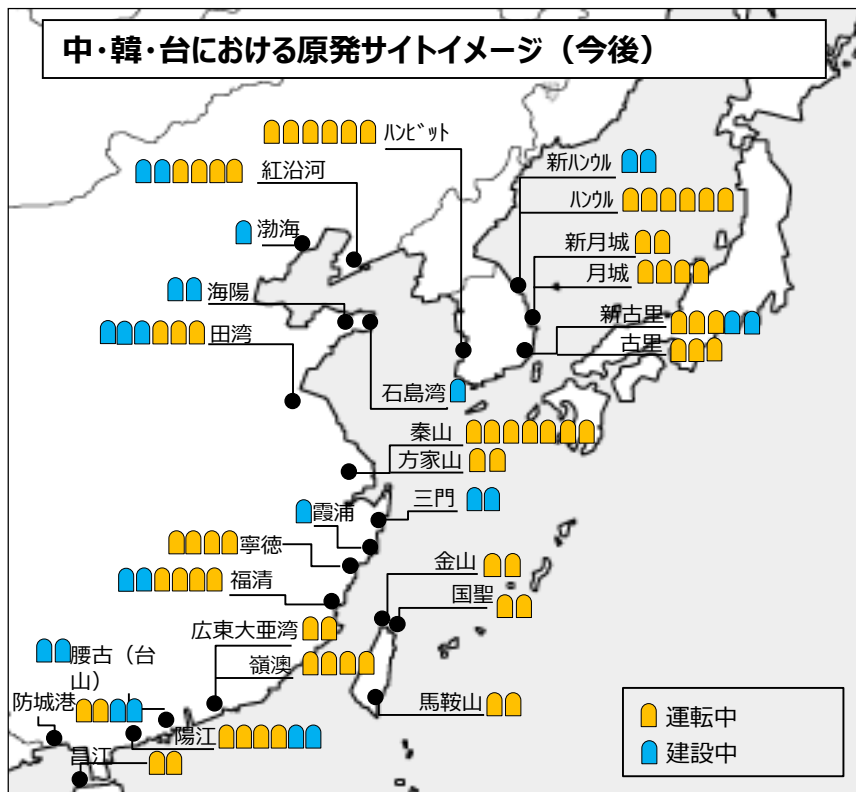
これまで16ヶ国がIAEA基盤整備レビューを受入れ、IAEAの助言を踏まえ基盤整備を推進。
(IAEA統合原子力基盤レビュー)

(iv) 核不拡散・原子力安全における期待の高まり②

- 世界では**新たに原子力を導入する国が増加**。アジアにおいても原子力利用は高まっていく。
- **原子力分野での長年の経験を有する日本**に対しては、**世界、特にアジア**の核不拡散・原子力安全での貢献が期待されている。

＜東アジアにおける原発の状況＞

中・韓・台における原発サイトイメージ（今後）



運転中 + 建設中 原発基数

(中国) 38基 + 20基
(韓国) 24基 + 4基
(台湾) 6基

アセアン



- 経済成長・電化率向上から電力需要増加予想。マレーシア、タイ、インドネシアは新設、フィリピンは建設停止原発再開計画。
- 中国はカンボジア及びタイとの間で原子力協力に関するMOUを締結。マレーシアでも華僑系経済力を背景に働きかけを強化。
- ロシアはフィリピンとの間で原子力協力に関するMOUを締結。

インド



- 2022年には世界一となる人口増加と経済成長が見込まれ、高い電力需要を見込む。
- 原子力の設備容量を2032年までに63GWまで、2050年までに全発電容量の4分の1まで拡大する計画。
- 米国に2サイト（12基）、ロシアに2サイト（12基、うち2基運転中）、フランスに1サイト（6基）を割当て済み。

サウジアラビア



- 石油に依存した経済からの脱却を目指す一方で、国内エネルギー需要も急増（10年で2倍）。
- 原子力及び再エネによる発電容量を2020年までに3.4GW、2030年までに9.5GW増加させる計画。原発16基の導入を予定。
- 2018年中に、PWR 2基（2.8GW）の建設にむけた入札を行う予定。10

(参考) 国際原子力市場における中国・ロシアの台頭

79 スリーマイル島
原発事故

86 チェルノブイリ
原発事故

97採択 05発効
京都議定書

11 福島第一
原発事故

1970年代

米国 76基
ソ連 26基
ドイツ 13基
カナダ 11基
日本 11基
フランス 9基
英国 7基

計 164基

1980年代

米国 66基
ソ連 48基
フランス 48基
日本 16基
ドイツ 14基
カナダ 13基
英国 10基

計 227基

1990年代

日本 16基
フランス 8基
カナダ 8基
米国 7基
ロシア 6基
インド 5基
韓国 4基

計 56基

2000年代

ロシア 9基
インド 7基
フランス 6基
日本 5基
韓国 4基
中国 3基
カナダ 3基

計 38基

2010年代

中国 26基
ロシア 5基
韓国 5基
インド 3基
米国 1基

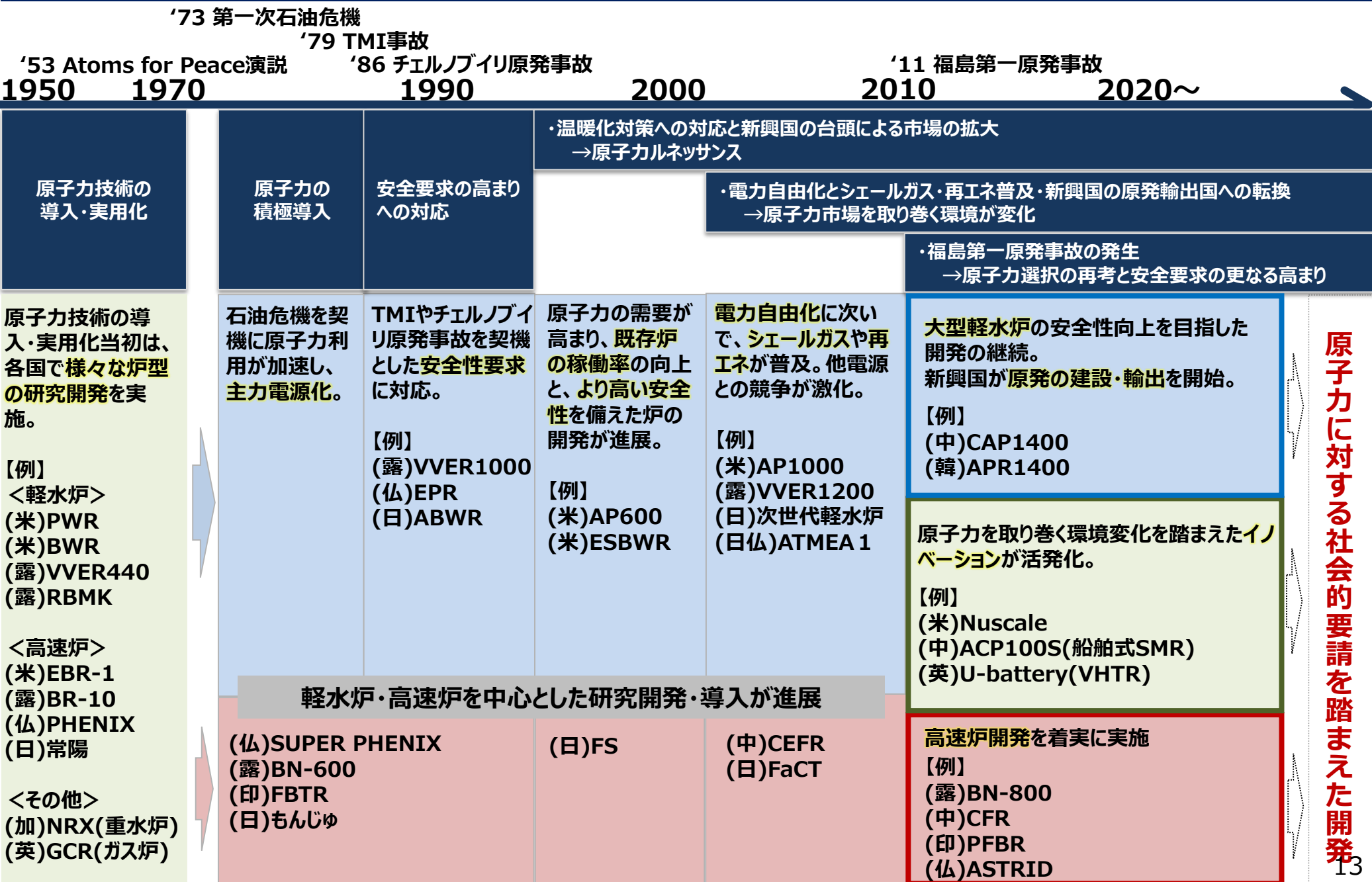
計 40基

(出所) 日本原子力産業協会

※期間中の運転開始基数。原子炉系統製造企業等によりカウント。研究炉等含む。

I .	原子力技術・人材に関する問題意識・・・・・・・・	p2
II .	我が国の原子力技術・人材を巡る課題・・・・	p4
	(i)	原子力人材の減少
	(ii)	研究開発機能の低下
	(iii)	サプライチェーンの劣化
	(iv)	核不拡散・原子力安全における期待の高まり
III .	世界の原子力技術を巡る動向・・・・・・・・	p12
	(i)	大型軽水炉の安全性・経済性向上
	(ii)	第4世代炉(ナトリウム冷却高速炉)の開発
	(iii)	多様な社会ニーズに対応するイノベーション促進
IV .	技術・人材の課題解決に向けた論点・・・・・・・・	p18

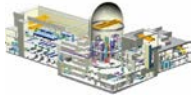
世界の原子力技術を巡る動向



原子力に対する社会的要請を踏まえた開発

(i) 大型軽水炉の安全性・経済性向上

- 現在の最新の商用原子炉は、**先進的な安全対策技術**を導入するとともに、**経済性**を向上した「第3世代+」。
- 各国とも、第3世代+炉を自国で建設した上で海外展開を促進。国内外での建設・運転経験を通じて、戦略的に**技術・人材やサプライチェーン**を維持・強化。
- 海外プロジェクトを通じて、技術・人材を維持・発展させ、次代の海外プロジェクトにつなげる**好循環**が生み出されている。

第3世代+炉の例	特徴	マザーマーケット	海外市場
AP1000 米国 	1. 系統を簡素化 2. 静的手段で安全系構成 ⇒ポンプ等の動的機器に依存しない	ボーグル原発 等 (2019年～順次運転予定)	中国：三門原発1,2号機 海陽原発1,2号機 (2018年～順次運転予定) インド、サウジアラビア等とも交渉中
EPR フランス 	1. 従来型PWRに比べ、経済性と安全性向上 2. 航空機衝突にも耐えうる格納容器 3. コアキャッチャー採用(炉心溶融対策)	フラマンヴィル原発 (2019年運転予定)	フィンランド：オルキルオト原発 (2018年運転予定) 中国：台山原発(2018年運転予定) 英国：ヒンクリー・ポイント原発 (2026年～順次運転予定)
APR1400 韓国 	1. 米国が開発したSystem 80+をベースに開発 2. 設計を簡素化し、制作期間や建設費を大幅に低減 3. 航空機衝突対策を施す等、より安全性を向上させた改良型(欧州型も設計)	新古里原発3号機 (2016年～運転) 新古里原発4,5,6号機 新ハヌル原発1,2号機 (2018年～順次運転予定)	UAE：バラカ1,2,3,4号機 (2018年～順次運転予定) サウジアラビア、チェコ、英国等に輸出推進の方針
華龍1号 中国 	1. 仏型PWRをベースに、中国が自主開発 2. 二重格納容器を採用等、安全性向上	福清原発5,6号機 防白港原発3,4号機 (2019年～順次運転予定)	パキスタン：輸出決定 英国、アルゼンチン、南アフリカ等とも交渉中
ABWR 日本 	1. 従来型BWRに比べ配管を簡素化、操作性向上 ⇒事故リスクを大幅に低減 2. 作業者の受ける放射線量低減	柏崎刈羽原発6,7号機 浜岡原発5号機 志賀原発2号機 等	英国：建設計画有

(ii) 第4世代炉（ナトリウム冷却高速炉）の開発

	実験炉		原型炉	実証炉	商用炉
日本	1977年初臨界 (常陽) <u>ループ型／14万kW (熱出力)</u>		1994年初臨界 (もんじゅ) <u>ループ型／28万kW</u>		
ロシア	1958年初臨界 <u>ループ型／0.8万kW (熱出力)</u>	1968年初臨界 <u>ループ型／1.2万kW</u>	1972年初臨界 <u>ループ型／15万kW</u>		
			1980年初臨界 <u>タンク型／60万kW</u>	2014年初臨界 <u>タンク型／88万kW</u>	2030年頃 <u>タンク型／122万kW</u>
中国	2010年初臨界 <u>タンク型／2万kW</u>			2025年頃 <u>タンク型／60万kW</u>	2030年頃 <u>タンク型</u>
インド	1985年初臨界 <u>ループ型／1.3万kW</u>		2018年初臨界予定 <u>タンク型／50万kW</u>	2025年頃 <u>タンク型／60万kW</u>	
仏国	1967年初臨界 <u>ループ型／4万kW (熱出力)</u>		1973年初臨界 <u>タンク型／25万kW</u>	1985年臨界 <u>タンク型／124万kW</u> ※1998年に廃止決定済	
				2030年代 (ASTRID) <u>タンク型／60万kW</u>	

(注)

- ・アメリカは、多くの実験炉の開発・運転経験を保持。核不拡散政策の変更により1977年に原型炉の建設を無期延期したが、研究開発は継続。
- ・イギリスは、実験炉・原型炉の運転経験があるが、北海油田の発見等を背景に計画を中止。ただし、将来的には高速炉サイクルへの移行が必要としている。
- ・ドイツは、実験炉の運転経験があるが、原型炉の建設中に、政策議論や財政難のため中止。
- ・韓国は近年活発に研究開発を実施。2028年に原型炉を建設予定。

(平成30年2月時点)

(iii) 多様な社会ニーズに対応するイノベーションの促進：各国の施策

- 米国やカナダ、英国では、政府が**ロードマップや戦略の策定**、コンペ等による**競争的な開発**や**ベンチャー企業の参入の促進**、**規制当局との連携**などを実施し、原子力技術における**民主導のイノベーション**を後押し。

 米国	 英国	 カナダ
○2012年 SMRの認可技術支援に係る予算措置プログラムを開始 ○2015年11月 『GAIN』(Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear)プログラムにおいて国立研究所の設備を提供し、研究開発を促進 ○2017年1月 『革新炉開発と導入のビジョンと戦略』を発行	○2013年3月 『原子力産業戦略』を策定 ○2015年11月 政府がSMR含む原子力研究開発への予算措置を発表 ○2017年12月 第四世代SMR開発の予算措置プログラムを発表	○2016年 規制当局が許認可前設計審査を開始 ○2017年4月 SMR開発の『10年プラン』を発表 ○2017年11月 テレストリアル社の許認可前設計審査フェーズ1を完了

カナダの取組の特徴

政府／国立研究所

- ・**資金支援**
テレストリアル社に対し**約5億円**等
- ・**立地支援**
チョークリバーの研究所を**建設地提供**等

許認可前設計審査成果（安全性等）の**情報共有**

規制当局

- ・**許認可前設計審査の実施**(4段階)
結果は将来の安全審査を制約しないが、事務局意見が参考に表示されることになり、事業者の**予見性確保に貢献**。

ベンダー	炉型	電気出力(MWe)	レビュー開始時期	状況
テレストリアル社	熔融塩炉	200	2016年4月	フェーズ1完了(17.11) フェーズ2 審査実施契約締結の準備中
ウルトラセーフニュークリア社/グローバルファーストパワー	高温ガス炉	5-10	2016年12月	フェーズ1 審査中
リードコールドニュークリア社	熔融鉛炉	3	2017年1月	ベンダーの要望によりフェーズ1 審査 中断中
アーク/GE日立社	ナトリウム冷却炉	100	2017年秋	フェーズ1 審査中
ウレンコ	高温ガス炉	4	2018年春（暫定）	審査実施契約締結の準備中
モルテックスエナジー	熔融塩炉	300	2017年12月	フェーズ1 審査中
ホルテックインターナショナル社	加圧水炉	160	未定	審査実施契約締結の準備中
スターコアニュークリア	高温ガス炉	10	未定	審査実施契約締結の準備中

(iii) 多様な社会ニーズに対応するイノベーションの促進：世界の最新炉型

軽水炉 (大型)

AP1000
100万kW
WH/東芝



ABWR
135万kW
日立/東芝



ATMEA1
110万kW
AREVA/三菱重工



EPR
160万kW
AREVA



華龍 1号
115万kW
CGN&CNNC



CAP1400
140万kW
国家電投



VVER-1200
120万kW
ロスアトム



軽水炉 (中小型)

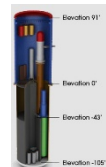
受動的安全性を備えた設計

Nuscale
60万kW
Nuscale社



一体型PWR SMR

SMR-160
16万kW
ホルテック



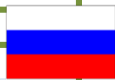
船舶式SMR

ACP100S
10万kW
CNNC



浮揚式原発

KLT-40S
5万kW
OKBM



非軽水炉

950℃の超高温熱供給で水素製造

HTTR(VHTR)
3万kW
JAEA



ナトリウム高速実証炉

ASTRID(SFR)
60万kW
CEA



40年間燃料交換が不要

TWR-P (SFR)
60万kW
ビル・ゲイツと中国の合併会社
Terra Power/CNNC



送電線の届かない過疎地での自立運用

U-battery(VHTR)
0.4万kW
高温熱で海水の淡水化
URENCO



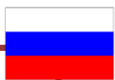
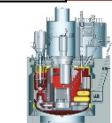
液体燃料のため炉心溶融しない

IMSR-400(MSR)
20万kW
Terrestrial社



営業運転中のナトリウム高速実証炉

BN-800(SFR)
88万kW
OKBM



I .	原子力技術・人材に関する問題意識・・・・・・・・	p2
II .	我が国の原子力技術・人材を巡る課題・・・・	p4
	(i)	原子力人材の減少
	(ii)	研究開発機能の低下
	(iii)	サプライチェーンの劣化
	(iv)	核不拡散・原子力安全における期待の高まり
III .	世界の原子力技術を巡る動向・・・・・・・・	p12
	(i)	大型軽水炉の安全性・経済性向上
	(ii)	第4世代炉(ナトリウム冷却高速炉)の開発
	(iii)	多様な社会ニーズに対応するイノベーション促進
IV .	技術・人材の課題解決に向けた論点・・・・・・・・	p18

原子力の技術・人材の課題解決に向けた論点

論点①

1. 安全性向上・廃炉・サイクル等様々な技術・人材が必要
2. 原子力関連業務に従事する人材や生の現場は減少傾向

⇒技術・人材をどう維持・発展させるか

論点②

1. 研究開発の求められる分野はなおも多数存在
2. 原子力研究の人気は低迷、研究者や原子力業界を目指す学生は減少傾向

⇒高度な研究開発基盤や人材をどのように維持すべきか、特に若手にとっての意義や魅力をどのように伝えるか

論点③

1. 原子力特有の技術を保有する、裾野の広いサプライチェーンが存在
2. 震災以降、サプライチェーンの縮小や撤退が深刻化

⇒安全かつ効率的な原子力利用の前提となるサプライチェーンをどう維持するか

論点④

1. 世界が核不拡散・安全面での我が国の貢献に期待。
2. アジアを中心に世界の原子力利用の裾野は拡大

⇒世界、特にアジアの原子力安全・不拡散に貢献するため、何が必要か

論点⑤

1. 電力自由化、シェールガスや再生可能エネルギーの普及
2. 新しいコンセプトの研究開発が海外で進展

⇒多様な社会ニーズに対応し、世界に通用するイノベーションを促進するために、何が必要か