

再エネ主力電源化に貢献する 原子力の持続的活用の提言

2022年7月15日

保全学会

(コーディネータ; 田中治邦)

目次

- 提言検討の経緯（はじめに）
- 提言
- 原子力を取り巻く状況の変化
- 提言セッションでの発表概要
- まとめ

はじめに

提言検討の経緯

昨年度の提言と今年度の方針

■ 昨年度の日本保全学会からの提言

◇ 我国の原子力施設の**安全性を向上**させるための提言（以下は主なもの）

- 全ステークホルダーは、新検査制度の運用をチェックし制度改善に努力
- 事業者は、安全性向上評価制度を活用
- 規制当局は、新技術導入、保全適正化を進めやすい環境を整備
- プラントメーカーは、ヒューマンウェアによる安全性向上も提案
- 学会は、安全規制が自治体・国民から信頼されるよう第三者活動を活発化

◇ 「**エネルギー問題**」への提言

- カーボンニュートラルに向け原子力の役割を政策として明確化し総合的取組
- 安全性の向上についてステークホルダーと対話
- 技術継承とサプライチェーン維持、価値を高める技術革新に取組

■ 今年度の提言

◇ 昨年度の提言の内容は、**今年度も有効**である

◇ そこで今年度は、**新たな情勢**に配慮しつつ、更に**具体化**を図ることとする

- テーマは**エネルギー問題に係わる技術的提言**とし、安全性向上に係わる具体化は来年度に期待

提言

提言I; 将来のエネルギー確保に向けた取り組みの強化

提言II; 原子力発電規模の増加

提言III; 原子力の長期的な活用

(R4年9月15日 資源エネルギー庁提出)

提言もくじ

■ 提言I; 将来のエネルギー確保に向けた取り組みの強化

- ◇ 提言I-1 エネルギー安定供給の確保
- ◇ 提言I-2 最適なエネルギーミックスの追及
- ◇ 提言I-3 最適な電源構成に基づく適切な送配電系統の設計

■ 提言II; 原子力発電規模の増加

- ◇ 提言II-1 全基再稼働と新增設
- ◇ 提言II-2 供用期間の延伸
- ◇ 提言II-3 利用率向上の取り組み
- ◇ 提言II-4 次世代炉の開発

■ 提言III; 原子力の長期的な活用

- ◇ 提言III-1 ウラン燃料調達の長期安定確保
- ◇ 提言III-2 負荷追従運転での貢献
- ◇ 提言III-3 核燃料サイクルの完成と廃棄物処分の確立

提言I; 将来のエネルギー確保に向けた取り組みの強化

■ 提言I-1 エネルギー安定供給の確保

「再生可能エネルギーの主力電源化のためには、その変動性を補償する低炭素バックアップ電源が必要で、それには必要な規模の原子力発電を活用することが、エネルギー安定供給の確保を可能とし、わが国のエネルギー安全保障に繋がる」

◇ 第6次エネ基本文の3ヶ所に現れる「(経済的に自立し脱炭素化した)再生可能エネルギーの拡大を図る中で、可能な限り原発依存度を低減する」との方針を改め、

■ 提言I-2 最適なエネルギーミックスの追及

「国民負担の最小化を考慮した、電源のベストミックスを図る取り組みが必要である」

◇ 第6次エネ基と共に公表された電源別発電コスト試算によれば、低炭素電源の限界費用は太陽光19.9円/kWh、風力18.9円/kWh、原子力14.5円/kWhであり、提案された電源ミックスは市場の最適解ではない。

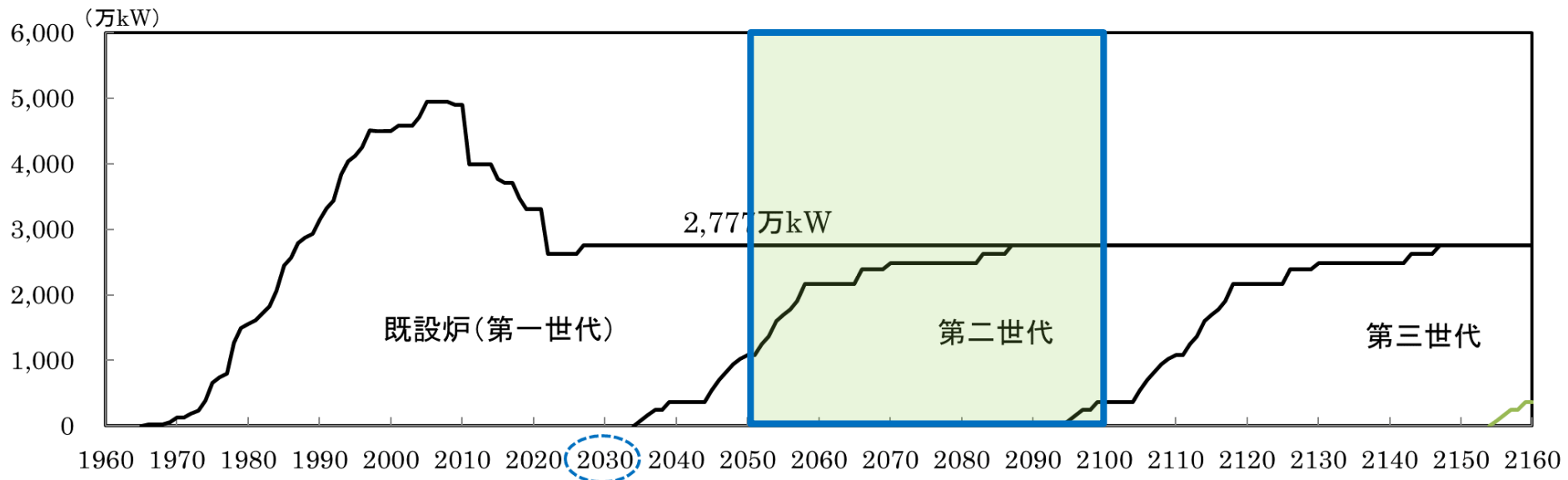
■ 提言I-3 最適な電源構成に基づく適切な送配電系統の設計

「再生可能エネルギーと原子力発電を連携させた送配電系統の強化と最適化(系統の利用効率の最大化)を図る」

◇ 太陽光は需要末端に広く分散立地し、風力は遠隔立地の洋上風力となる。

(参考) 原子力の持続的活用イメージ

- 2030年の原子力規模を2050年以降も持続的に活用すると想定
 - ◇ 36基全てを60年間運転しても、**2040年代半ばから大量リプレイス**が必要
 - ◇ 今から20年間しかなく、直ちに手続きに入ることが必要
 - ◇ リプレイスのピッチは**150万kW/年**で、次々と**大型炉**の運転開始が必要



提言II; 原子力発電規模の増加

■ 提言II-1 全基再稼働と新增設

「原子力発電の利活用の強化を図るため、稼働可能な停止中プラントの再稼働を進めるとともに、新增設の取り組みを推進する」

◇ 2030年度の全GHG排出は2013年度比46%減、電力供給に占める低炭素電源比率58%であり、カーボンニュートラル実現には取組の強化が必要

■ 提言II-2 供用期間の延伸

「リプレースと並行した新增設では原子力発電規模の拡大が遅れるため、既設の発電炉の長期運用の確立が必要である」

◇ 既設炉を60年で廃止すると、新增設はリプレースとなり効果は半減する。供用期間の延長(米国並みに80年)、炉停止期間の運転期間からの除外、更には定期安全レビューを重視して上限の撤廃を行う

■ 提言II-3 既設炉の利用率向上

「連続運転期間の延長、定検停止期間短縮は既に可能だが、運転中保全やアップレートなどに取り組むことも必要である」

■ 提言II-4 次世代炉の開発

「将来の原子力発電の拡大と長期利用に備え、高速炉の開発とその核燃料サイクルの完成、廃棄物処分の確立が要となる」

(参考) 再稼働と新規建設のイメージ

■ 必要規模が倍増する場合の既設炉再稼働と新規軽水炉建設

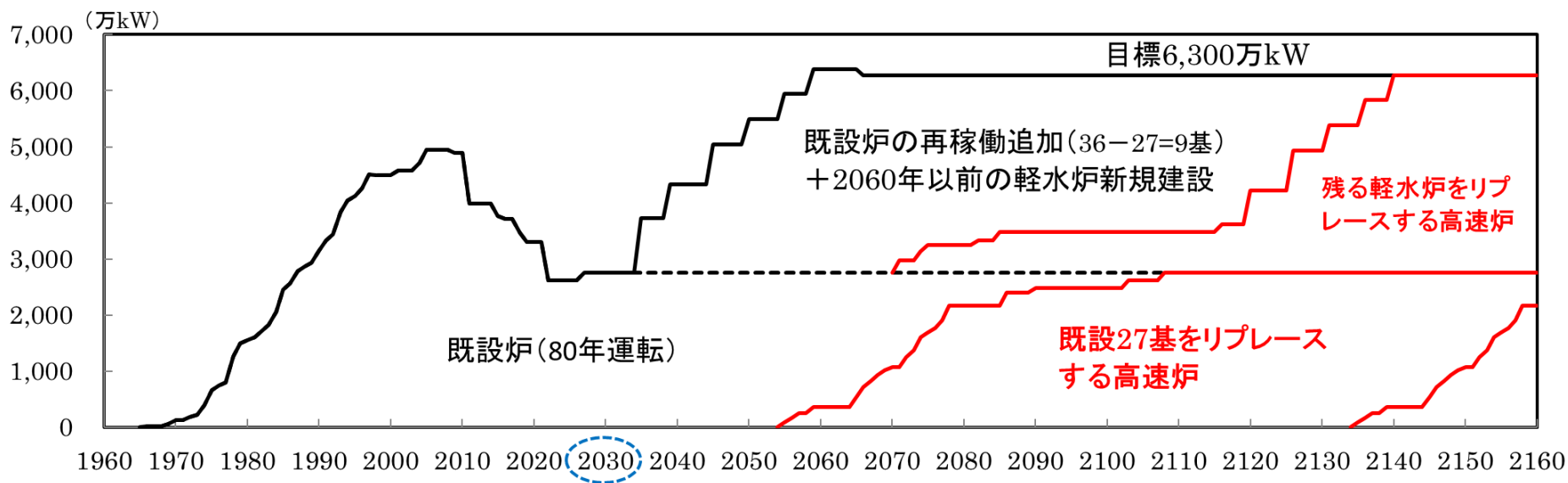
- ◇ **2030年**までに、再稼働申請済の27基； 合計2,775万kW
 - 再稼働済み10基＋許可済だが未稼働7基＋審査中10基
 - 既設炉25基と建設中の2基(島根3、大間)
- ◇ **2035年**までに、再稼働申請されていない既設炉 9基； 合計963万kW
 - 既設炉8基(40年が近い既設炉が1基あり要注意；柏崎刈羽1号)、および着工後の初期段階にある東京東通1号
- ◇ **2040年**までに、震災前に設置許可申請された4基； 合計604万kW
 - 敦賀3・4号、上関1号、川内3号
- ◇ **2045年**までに、建設意志が公表された実績のある5基； 合計713万kW
 - 美浜4号、浜岡6号、東京東通2号、東北東通2号、上関2号
- ◇ **2050年**までに、N1、N2、N3 3基 合計450万kW
- ◇ **2055年**までに、N4、N5、N6 3基 合計450万kW
- ◇ **2059年**までに、N7、N8、N9 3基 合計450万kW **総合計6,405万kW**

■ 2060年以降は、大型高速炉を運転開始(実証炉はその前)

(参考) 原子力発電規模の倍増イメージ

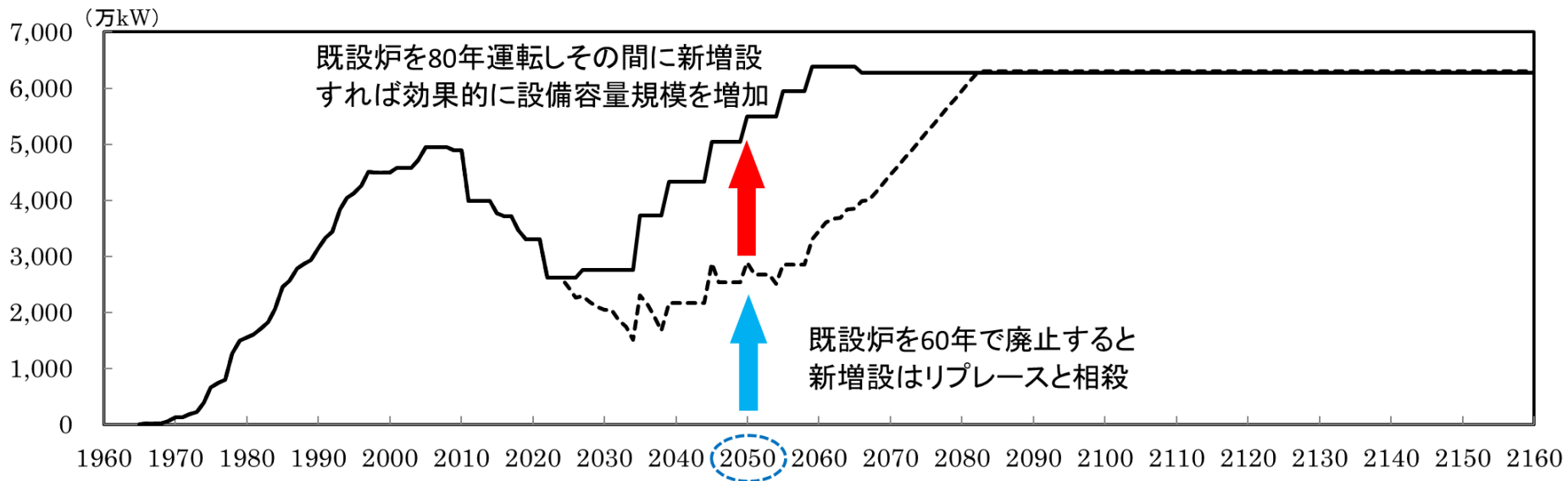
■ カーボンニュートラルには原子力規模の大幅増加が必要

- ◇ COPが2030年に求めるGHG排出削減は2010年基準で45%減だが、日本の46%削減の基準は**2013年で排出量は過去最大(2010年より8%多い)**
- ◇ 最終エネルギー消費の一部しか分担しない電力供給において、再エネと併せた**低炭素電源比率は2030年に58%**
- ◇ 厨房の電化、輸送部門のEV化、水素需要の増加で**今後電力需要は増加**
- ◇ **既設炉を80年運転**で維持しつつ**大型次世代炉の導入**に早急に着手すべき



(参考) 既設炉長期運転の必要性

- 既設炉を**60年**で順次廃止すると、今から取り組む**新增設は設備容量の低下と相殺**してしまい、2050年の倍増に遥かに届かない
- 既設炉を**長期運転**して維持しつつ、**その間に新增設**を行えば、効果的に原子力発電規模を増加できる



提言III; 原子力の長期的な活用

■ 提言III-1 ウラン燃料調達の長期安定確保

「将来原子力発電を長期にかつ安定して利用するためには、燃料の確保が重要であり、ウラン精鉱の調達、転換、濃縮、再転換・加工と、加えてそれらを結ぶ輸送体制も含めたフロントエンド全体に広がる視点で必要な整備が求められる」

- ◇ ウラン資源のカザフスタンからの搬出はロシアを通過するので、状況に応じてカナダや豪州からの調達の検討の必要がある。
- ◇ 日本への海上輸送再開に向け輸送体制の再構築が必要である

■ 提言III-2 負荷追従運転での貢献

「天候次第で出力変動し、負荷変化へ応ずることができない再生可能エネルギーを主力電源とするためには変動へのバックアップが重要であり、様々な炉型を駆使して、負荷追従運転の検討を進めなければならない」

- ◇ 太陽光・風力は天候次第で変動し、単独では需要の変化に応じられない
- ◇ 再エネ変動と負荷変化の間を補償する火力発電は大規模CCUSの実現、アンモニア・水素の供給量に不安あり、蓄電池にはコストがかかる
- ◇ 次世代大型軽水炉や高速炉などの新型炉は当然、また既設炉もその設備能力を活かして負荷追従運転し再エネ主力電源化に備えるべきである

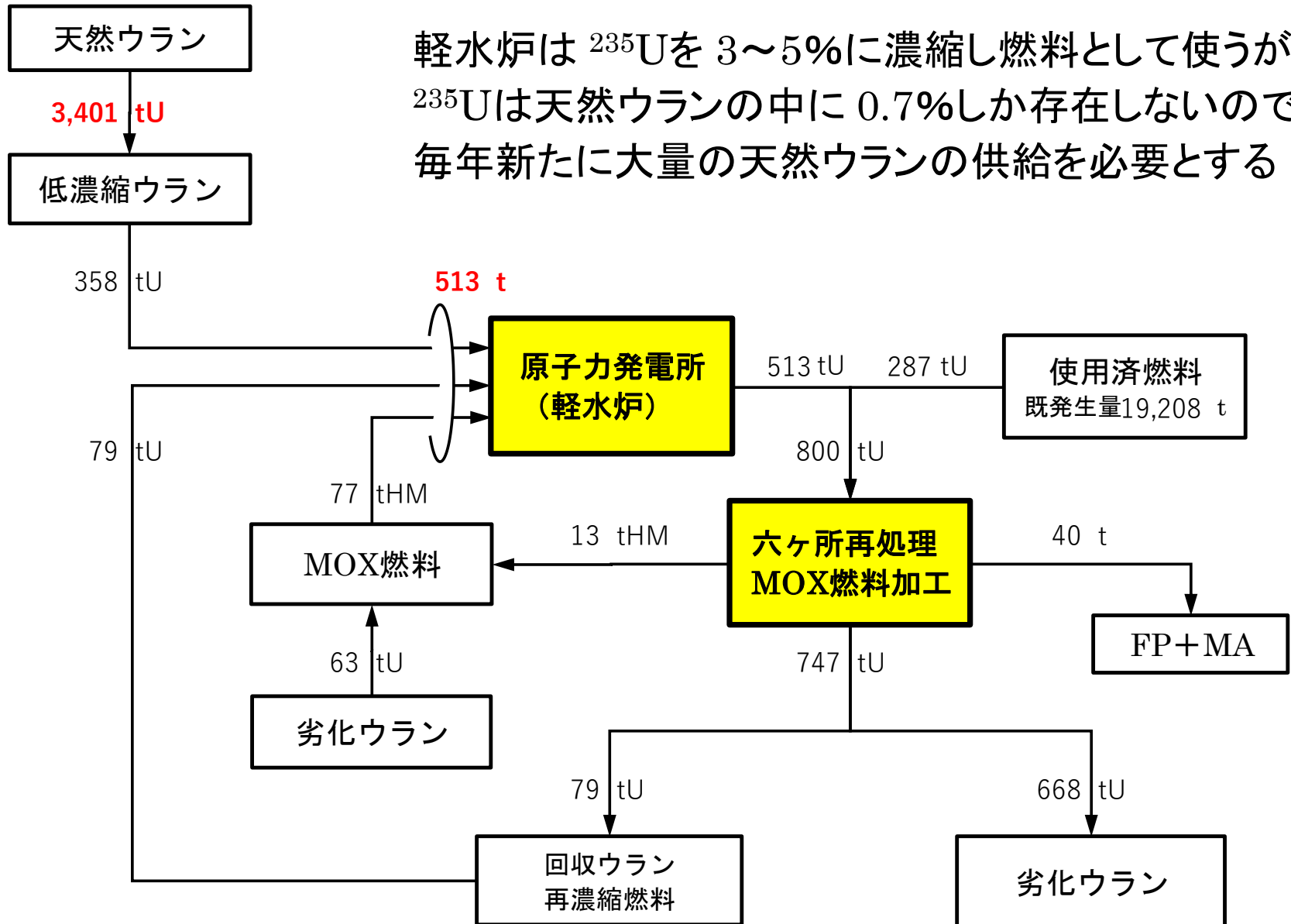
提言III；原子力の長期的な活用

■ 提言III-3 核燃料サイクルの完成と廃棄物処分の確立

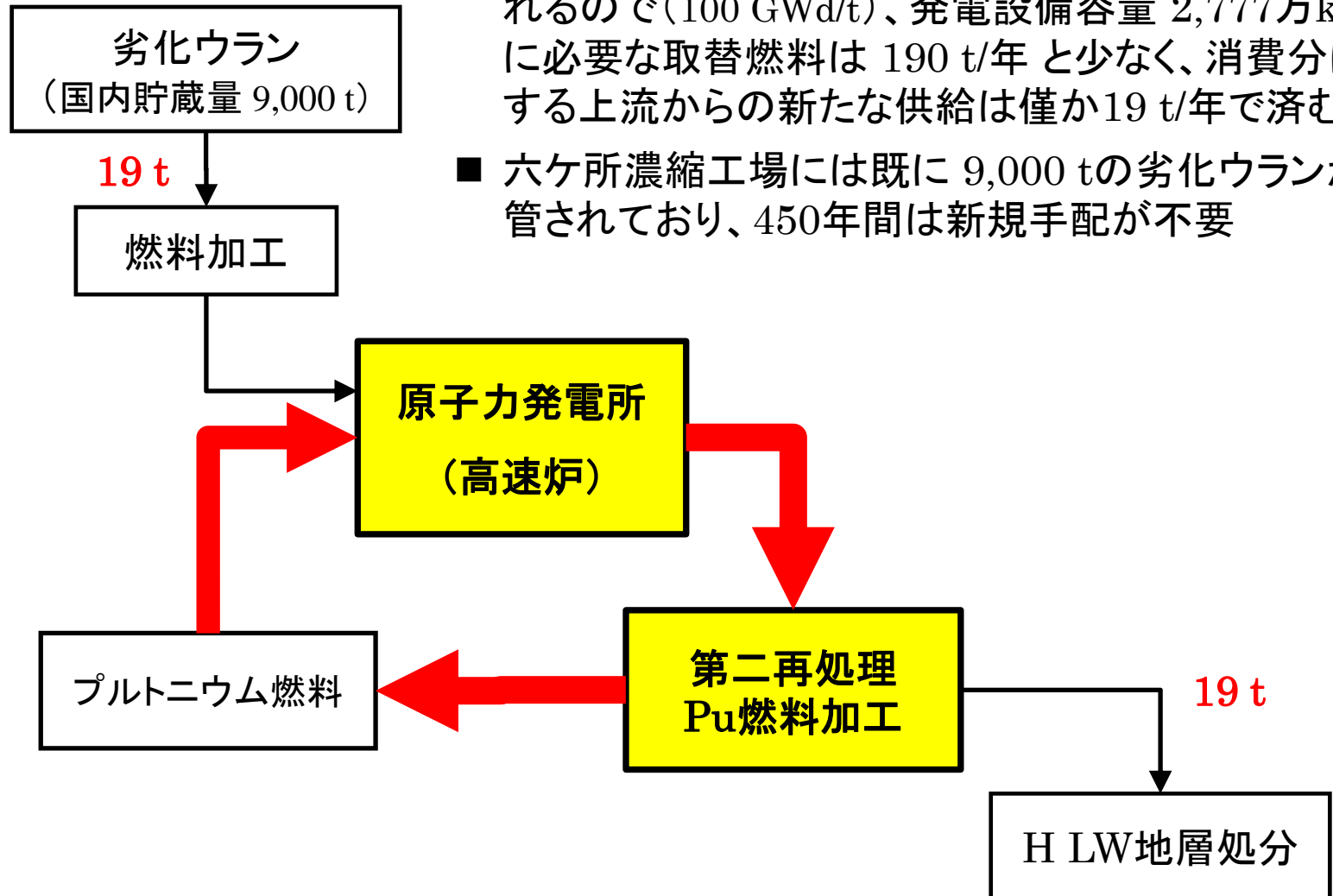
「将来の原子力発電の拡大と長期利用に備え、高速炉の開発とその核燃料サイクルの完成、廃棄物処分の確立が要となる」

- ◇ 長期に安定して原子力利用を続けるためには、新興国の原子力導入、先進国の原子力回帰による今世紀後半のウラン調達競争の激化にそなえ、**高速炉の実用化とその核燃料サイクルの確立**が必要である
- ◇ そのためには**日米協力と国内実証炉**の早期建設が重要である

(参考) 軽水炉燃料サイクルの物質フロー



(参考) 高速炉の核燃料サイクル



- 高速炉は熱効率が高く(42.5%)、取出燃焼度も高くとれるので(100 GWd/t)、発電設備容量 2,777万kWeに必要な取替燃料は 190 t/年 と少なく、消費分に対する上流からの新たな供給は僅か19 t/年で済む
- 六ヶ所濃縮工場には既に 9,000 tの劣化ウランが保管されており、450年間は新規手配が不要

エネルギーを取り巻く状況 の変化

ロシアのウクライナ軍事侵略の発生

- 安全保障理事会の常任理事国たる大国ロシアが、自国の安全保障に懸念ありと称して先に隣国へ軍事攻撃
 - ◇ **ジュネーブ条約** (1977年第一追加議定書;ロシアも締約)が禁止する文民に対する攻撃(無抵抗の民間人を殺戮)、民用物への攻撃(民間集合住宅等を砲爆撃)、危険な力を内蔵する工作物である**原発への攻撃**など**重大な違反行為**
 - ◇ 大統領たる人物が、これはネオナチとの戦いだと平然と**嘘をついて自国民を騙し**、更には、ソ連崩壊時に核兵器をロシアへ返し**NPT上の非保有国**となった国に対して**核兵器使用をほのめかす**などの暴挙
- **安保理の常任理事国**が行った不法行為に対し国連は機能せず
 - ◇ ロシア軍の即時撤退を求める安保理の決議案に対しロシアは**拒否権を発動**
- 自由主義陣営がとったロシアへの**経済制裁**
 - ◇ その影響は**全世界**にはね返り、**食料の供給危機**と**エネルギー一価格高騰**は、経済全体に悪影響を招いている
- **東アジアの政治情勢**を考慮すれば、**自衛力の強化**、友好国と協力した**安全保障体制**、**平和外交**と**核不拡散**は一体的に進めるべき
 - ◇ さもなくば、原発の運転員、原子力利用、エネルギー供給を守れない

ロシア依存脱却の実現可能性

- ロシアからのエネルギー資源輸入の縮小を目指す欧州諸国に合わせ、日本政府もエネルギーの**ロシア依存脱却**の方針を表明
 - ◇ しかし、欧州より低いとはいえ原油輸入の5%、天然ガス輸入の8%、石炭輸入の10%をロシアに依存する現状(統計は2019年)からの転換は、**代わりの輸入元の確保**を必要とし、それは欧州諸国とも競合して容易ではない
 - ◇ **輸送部門での石油ニーズ**は避けられず、**発電部門**での原油利用の回避は必要だが、今夏・来冬の**電力供給危機**も予想されそれは困難ではないか
 - ◇ **鉄鋼・セメント分野での石炭ニーズ**は避けられず、一方、**発電部門**でも**エネルギー価格上昇対策**として石炭利用は避けられない
 - ◇ **天然ガス**の消費節約は**発電・都市ガス・工業利用**のいずれも極めて難しい
- 欧州との競合、資源価格の高騰に鑑み；
 - ◇ 万一の場合に備え**原油備蓄(国家備蓄)**を回復
 - ◇ 利用を控えても**石油火力の設備を維持**
 - ◇ 特に、安易な**石炭火力**の設備廃止など言語道断
- エネルギー資源が極端に乏しい**日本の生き残り方策が重要**

エネルギー政策修正の必要性

- 長期的な脱炭素のニーズは変わらないものの、**第6次エネルギー基本計画は策定時点での前提が崩れている**
 - ◇ 特に「原子力依存度は**可能な限り低減**する」とした基本方針は早急に見直す必要がある
 - ◇ また、福島第一原発事故の後に急速に拡大された**電力自由化**の仕組みは、2年前の冬の関西圏、本年3月の関東圏のように予備率が限界を下回る事態を発生し、その数週間後には逆に太陽光で供給力が過剰になるという**電力需給の不安定化を招来**
 - **今夏・来冬にも同様の事態**が懸念されている
 - **新電力会社**が簡単に設立され、儲からなくなると**すぐに廃業**できるという制度を設けたことは、エネルギー供給が脆弱な我が国にとって甚だ問題
- このような状況において、**再生可能エネルギーの利用を促進しつつ、原子力利用を減らすことなく持続的に活用し、更にその規模を拡大**して行くことが我が国のエネルギー安全保障、経済安全保障、カーボンニュートラルを同時に実現するために必須

学会での本提言への 研究発表(全11件)

世界のエネルギー事情とロシア

G-1-1-1 武石礼司(東京国際大学)

■ 世界のエネルギー情勢が一変し、化石燃料価格が高騰

- ◇ コロナ禍が最悪期を脱し**需要回復**の一方、**風量不足**で風力発電量が低下
- ◇ **ロシア依存脱却**の為、**LNG**受入基地の建設、**石炭火力**の継続運転が必要
- ◇ **脱炭素**には時間がかかる(現在、再エネは11%、原子力は5%に過ぎない)
- ◇ **中口に頼る発展途上国**を自由主義側に引き戻す外交政策も必要

■ 日本でも**エネルギー価格高騰対策**が必要でエネ基は見直すべき

- ◇ ガソリン市販価格高騰抑制を目指し **25円/ℓ** の補助金
- ◇ 脱炭素よりも当面は化石燃料の確保、とりわけ安い**石炭**の利用が重要
- ◇ **化石燃料プロジェクト**を見下すことなく**資金提供**すべき
- ◇ 再エネやEVへの過度の期待は危うい
 - 太陽光パネル生産シェア7割の**中国は人権問題**を抱える
 - 風力はやがて**浮体式**の洋上設置が必要となるが、それは高コスト
 - 輸入木材・輸入ヤシ殻に頼る**バイオマス発電**は炭素中立か疑問
 - **EV・蓄電池**は希少資源を消費し、製造・廃棄の両面で多大の環境負荷
- ◇ **原子力の早期再稼働**が重要

第6次エネルギー基本計画

G-1-1-2 村上朋子(日本エネルギー経済研究所)

- 我が国は供給不安に直面するリスクを常に抱えている
 - ◇ エネルギー安全保障は一日にして成らず、しかし、現在のエネ基は・・・
- **2050年**の記述が先にあり、原子力については矛盾した記載
 - ◇ 2050年に向けて、「**可能な限り原発依存度を低減する**」 3ヶ所
 - ◇ 複数シナリオの選択肢として、「**必要な規模を持続的に活用していく**」 1ヶ所
- **2030年度**におけるエネルギー需給の見通し；
 - ◇ 一次エネルギー供給；4億3,000万kl
 - その内、再エネ22～23%、原子力9～10%
 - **エネルギー自給率30%程度**
 - ◇ GHG排出量
 - エネルギー起源CO₂、エネ起源以外CO₂、他のGHG、吸収源対策を考慮
 - 2013年度比で**全GHG排出46%減**
 - ◇ 電力供給；9,340億kWh
 - その内、再エネ36～38%、原子力20～22%、水素・アンモニア1%
 - **低炭素電源比率58%**
 - ◇ 電力コスト；8.6～8.8 兆円/年（再エネ及び化石燃料の価格低下を想定）
発電単価； **9.9～10.2 円/kWh**（旧ミックスでは 9.4～9.7円/kWh）

カーボンニュートラルの最適電源構成

G-1-1-3 藤井康正(東京大学)

■ 現在価値換算した2020～2120年の**発電コスト合計を最小化する最適電源構成**を線形計画法で解析

- ◇ 2050年以降のCO₂排出ゼロ、電力需要は一定(919TWh/年)
- ◇ 長期にわたる将来の計算で**送電制約を無視**(遠隔立地の洋上風力に有利)
- ◇ **太陽光とバッテリーの価格低下**を楽観的に想定

原子力	4,000 \$/kW	ウラン	40～290 \$/lbU ₃ O ₈
太陽光	1,400～900 \$/kW	洋上風力	2,500 \$/kW
バッテリー	200～50 \$/kWh		

■ 計算結果

- ◇ 脱原子力よりも、**原子力上限なしの方が総費用が小さい**
- ◇ 最適電源構成;

脱原子力では風力が7割、 原子力上限なしでは原子力が7割

- ◇ 発電単価は原子力の方が再エネより高いが、例えば太陽光が働ける昼間などは供給過剰で市場価格が下落する一方、原子力は市場価格がある程度以上高く維持された時間にも発電できることから、最適容量は大きくなる

再エネ主力電源での送配電系統

G-1-1-4 舟木剛 G-1-1-5 高木喜久雄 G-1-1-6 岩田章裕

(大阪大学

東芝ESS

関西電力)

- **風力発電を大規模に導入**しようとする、消費地から遠く、しかも浮体式の洋上風力となる
 - ◇ **海底ケーブル**で首都圏まで**長距離の直流送電**を行う
- **太陽光発電が消費地で大規模に分散配置**される場合、配電系統の整備が必要
 - ◇ **潮流制御、電圧制御**が複雑化し、エネルギーマネジメントも必要となる
 - ◇ **下流設備の容量**は小さく、増強が必要となる(架線の太さ順が既往と逆)
 - ◇ **スマートグリッド・マイクログリッド**はその中で対応しなければならない
 - ◇ 配電系統監視・制御の高度化が必要である
- **再エネの出力変動は数千万kWの可能性あり**
 - ◇ **蓄電池やDR**では対応困難
 - ◇ 火力・原子力の出力制御による補償が経済的

日本の将来を支える原子力を構想

G-2-1-1 吉川栄和、森下和功(京都大学)

■ 米国原子力の成功に学ぶべき

- ◇ 米国では**利用率とPI**が向上し、**経済性と安全性が同時に改善**
- ◇ **日本**では安全神話がSA・防災対策を遅らせ、福一事故で国民信頼を喪失
- ◇ **IAEA**は原子力のSDGsへの貢献を強調するが、**日本**ではマスコミ論調・国民理解が改善せず、規制・政治・司法が再稼働の遅滞に影響

■ **大型次世代炉**が地域社会と共生し、カーボンニュートラルとエネルギー安全保障を達成するために**3つのアプローチ**を提案;

- ◇ 原子力電源**立地地域との共存共創**を目指す原子力発電事業者へ転換
- ◇ ①原子力事業者自身、②地域企業と協力、③地域住民の参加、という3層構成の**アクティブラーニング**を実施
- ◇ 各立地地域で3段階の目標達成
 - エネ基で想定する**全原発の稼働**、米国の成功に学んでPI向上、安全性、経済性、SDGs親和性をアピール
 - まだ**解体廃炉に着手していない原発を再稼働**することに方針転換
 - 既に**解体廃炉に着手した原発用地に次世代炉新設**の検討開始

原子力の役割再構築のための技術開発

G-2-1-2 村上健太(東京大学)

■ 現状の課題

- ◇ 「厳しい規制基準」を起点とした原子力政策は一方通行なので良くない
- ◇ ステークホルダの意見を織り込む柔軟さは官民両方に求められる

■ 原子力業界はステークホルダの意見を織り込むため、**複線的なビジョンと複数の技術オプション**を十分前もって提示すべき

- ◇ 世界で常識な**既設炉の利用拡大策**により資産を有効活用すべき
- ◇ **新設炉の性能をベンチマーク**しながら質の高い長期運転を実現すべき
- ◇ CO₂排出だけでなく**SF発生**を効率的に減らす燃料運用を検討すべき
- ◇ 燃料運用はリスクのアロケーション。**自治体の適切な関与**が必要
- ◇ **バックエンド施設もアップレート**可能
- ◇ **再エネをサポート**する提案(GFや負荷追従)の価値を定量化するべき
- ◇ **短期(衛生・教育)、中期(SMR)、長期(大型炉)**のMulti-trackでODAの対象になるようなR&Dを行い、**人材・技術の避難先**として活用すべき

ウラン調達と輸送

G-2-1-3 久木原路子、北村佑介、辻脩志(住友商事株)

■ ウラン資源の調達

- ◇ ロシア産ウランの禁輸の影響は大きくないものと推定(世界の6%)
- ◇ しかし、最大の生産国**カザフスタン**(世界の41%)からの**搬出経路**に懸念あり
 - 我が国にも一部の鉱山権益を持つ商社、電力会社等があり、輸入実績もある
- ◇ **代替供給元の確保**が重要(カナダ、豪州)
 - 過去の供給過剰で**休眠鉱山**、**未開発鉱山**あり
- ◇ 日本は原発長期停止とウラン保有在庫の関係で、当面は欧州の様子見

■ ウラン濃縮

- ◇ ロシアの濃縮設備能力は世界の4割を超えていることに注意が必要

■ 日本への輸送の課題

- ◇ 2014年にカナダ東部の港で天然UF₆のシリンダが落下する事態が発生
 - 放射能漏洩は無かったが、一時期港が使えなくなったことの重大性が認識され、**多くの船会社が放射性物質の輸送から撤退**
- ◇ 従って、原子力利用の回復に伴う本格的な日本への輸送再開に当たっては、**輸送コストの上昇**は必至と推定
- ◇ 昨今の化石燃料価格高騰の影響で**輸送船の燃料代**も上乘せとなろう
- ◇ これまでよりも早いリードタイムでの輸送手段の確保が肝要

原子力の負荷追従能力

G-2-1-4 三宅修平、大槻昇平、松井昇(MHI) G-2-1-5 小岩井正俊、富永真哉、山田穰(東芝)

■ 現在の原子力の運用は**最大出力での一定運転**(基底負荷対応)

◇ この理由は、負荷追従能力が無いためではなく、可変費が安いから

■ 計画的な日間出力調整、給電指令に基づくAFC、自立的なGFによる**負荷追従運転は既設炉でも技術的には可能**

◇ BWR; 制御棒を動かすことなく、**炉心再循環流量制御**を自動モードとして負荷偏差信号(タービン速度/負荷要求信号と主蒸気圧力偏差信号との差)により原子炉出力を負荷に追従させることが可能(福一3・4・5号、福二1号、柏崎1号で試験実績あり)

◇ PWR; **2次系のGFと1次系の負のフィードバック**による原子炉出力変化とを組み合わせ、また、サイクル末期を除き**制御棒の自動操作**と手動の**ホウ素濃度調整**により大きな出力調整が可能(美浜3号、伊方2号で試験実績あり)

■ **再エネ主流時代**に負荷追従できる水力の規模、火力のCCUS・輸入水素利用に限界がある場合、**原子力は利用率が下がっても出力調整・負荷追従**をする必要がある

◇ これによる原子力の発電単価アップは原子力にその責は無い

◇ 発電用蒸気タービンを用い電力系統に慣性力・同期化力を提供できる原子力の**負荷追従運転の本格運用に向け真剣に準備に取り組むべき**