

地球温暖化問題における 原子力エネルギーの役割

-高温ガス炉による熱供給と
高速炉による高レベル放射性廃棄物処理について-

キヤノングローバル戦略研究所

湯原哲夫

2015年2月3日

本シンポジウムの目的(専門家の対話)

- 1. 気候変動問題と原子力エネルギー** (全体論:湯原)
 - ・世界と日本のGHG排出パスウェイと長期エネルギー構成
 - ・世界の長期的電源構成における原子力の役割
 - ・新しいエネルギー基本計画の方向性
- 2. 高温ガス炉の役割** (米国における開発の動向を米国NGNP & GA社から、日本の方向を岡本教授から)
 - ・固有な安全性と熱供給・水素製造
 - ・多目的高温ガス炉の開発
 - ・国際協力による開発
- 3. 燃料サイクルと高速炉の役割** (導入スケジュール等具体論 飯田氏)
 - ・軽水炉の維持と燃料サイクルの推進
 - ・高速増殖炉の役割と高レベル廃棄物処分
 - ・長期的な導入計画

目指すべきコンセンサス:具体的展望

- ①高温ガス炉開発における国際協力のあり方
- ②燃料サイクルの維持と高速増殖炉導入計画の長期スケジュールと具体的規模

CIGS エネルギー2050研究会 2013年12月第3回国際シンポジウム
「地球温暖化抑制で世界で共有する長期エネルギービジョン」で高温ガス炉を紹介

2014年2月第4回国内シンポジウム

「国内シンポジウム：高温ガス炉と高レベル核廃棄物の消滅処理について」

プログラム

1. 「地球温暖化抑制のエネルギー構成と原子力開発の役割」 CIGS 湯原哲夫
2. 「高温ガス炉の現状と展望(固有な安全性を有する多目的高温ガス炉の開発の現状)JAEA 小川益郎
3. 「高温ガス炉が拓く革新的低炭素エネルギーシステム(産業用プロセスヒートの供給)」
東京工業大学 加藤之貴
4. 「高レベル放射性廃棄物の消滅処理について」(株)イーツーエム 飯田式彦
5. ラウンドテーブル・ディスカッション
エネルギー総合工学研究所 : 松井一秋
日本エネルギー経済研究所: 松尾雄司
東京大学: 金子祥三、藤井康正、小宮山涼一
電力中央研究所: 木下幹康
CIGS: 日下一正、澤昭裕、氏田博士、段烽軍

高温ガス炉開発の基本的考え方(前回のまとめ)

1. 高温ガス炉

- ・高い安全性(自然に停止、冷却、高い放射性物質閉じ込め能力)
- ・燃料の高効率利用による資源問題への貢献
- ・熱利用による温室効果ガス排出削減に貢献
- ・水素社会への貢献

2. これまでの高温ガス炉技術の取組: 研究開発を継続

- ・政策原子力長期計画～エネルギー基本計画
- ・原子力機構におけるHTTRを用いた研究開発、水素製造技術の研究開発等

3. 国外の高温ガス炉の開発を取り巻く現状と動向

- ・第4世代原子力システムとしての位置づけ
- ・高温ガス炉を巡るこれまでの国際動向(米、英、独)、停止理由の検討と対策
- ・高温ガス炉を巡る現在の国際動向(米、中、韓、カザフ、インドネシア)
- ・国際的な取組を強化する上での高度な技術力の維持

高温ガス炉に関する最近の公報、報道記事 (Google News)

- 高温ガス炉」世界が注目 より安全・低CO2の原子炉、原子力機構が実験成功 2011.1.17日経
- 「高温ガス炉」の研究が国内外で加速している。日本原子力研究開発機構は2010年12月、高温ガス炉の研究炉「高温工学試験研究炉 (HTTR)」で炉の安全性を確かめる実験に成功。高温ガス炉は中国や韓国が早期実用化を目指している。米国やカザフスタンは原子力機構の技術に関心を寄せている。
- 「高温ガス炉」開発推進へ 文科省が「高温ガス炉技術研究開発作業部会設置 平成26年6月
- 「高温ガス炉技術開発に係る今後の研究開発の進め方について」報告書(中間とりまとめ)を公表平成26年9月文科省HP
- 注目高まる安全な原発 日本がトップ独走、次世代型「高温ガス炉」 ITmedia-2014/08/26
- 高温ガス炉、再稼働を申請 原子力機構が規制委に 日本経済新聞-2014/11/26
- より安全な原子炉があった 実力再認識の国産次世代炉 産経新聞 論説委員・長辻 -2014/11/29
- 高温ガス炉、今後の「解の一つ」 電気新聞2014.12.2
- 高温ガス炉： 中国と一騎打ち、インドネシアと次世代原発開発 読売新聞-2015/01/15
- プルトニウムを次世代原子炉「高温ガス炉」の燃料に 東大・原子力機構など 日本経済新聞- 2015.1.26
- 日本オリジナルの安全な原発に市場はあるのか エコノミックニュース -2015/01/06
- 新日鉄住金室蘭に水素増幅試験プラント設置【2015年1月30日(金)室蘭新報】

地球温暖化抑制と原子力の役割・課題

1. 地球温暖化：IPCC第5次報告書（2014）からのメッセージ

- 今世紀の温度上昇を2℃以下にするためには、2100年迄に二酸化炭素の排出をゼロにする。
- 大気中濃度のオーバーシュートも考慮に入れた排出パスウェイの提示
- 今世紀末に地球の平均温度上昇を2℃以下（50%確かさ）で5つのカテゴリー

2. CIGSからの提案地球温暖化抑制に関する提言（2009～）

- オーバーシュート・ゼロエミッション・シナリオによる温室効果ガスの排出計画（制約）今世紀末2℃以下を堅持し、総排出量650GtC、2150年頃にゼロエミッション
- 世界全体の最適化（コストミニマム）に基づく 長期エネルギー構成とGHG排出 と 長期エネルギー供給構成と電源計画
- 経済性（投資と効果）と革新技術の開発・普及の実現

3. これ迄のCIGSシンポジウムにおける原子力問題について

- 2012年：福島事故の技術的原因とその技術的課題と克服
- 2013年：2030年&2050年における我国のエネルギー構成について
- 2013年：12月国際
- 2014年：2月国内・温暖化抑制と高温ガス炉の開発（小川益郎氏）
 - ・高温ガス炉と産業用プロセスヒートへの利用（小川益郎氏、加藤之貴氏）
 - ・高レベル廃棄物の処理（減容化と低レベル化）の展望（飯田式彦氏）

4. 今回の課題

- ①2100年迄の電源構成における原子力の役割、燃料サイクルの規模。廃棄物処理の規模も含めて)
 - ・ 軽水炉-燃料サイクル-高速増殖炉- 高レベル廃棄物の処理処分
 - ・ 軽水炉の普及に伴う必要な規模、技術開発の動向)
 - ・ 世界と我が国の高速炉導入規模と
- ②2100年迄の化石燃料による産業用プロセスヒート（今回は米国の動向を中心に）
 - ・高温ガス炉による熱供給・水素供給
 - ・国際協力による開発について

原子力発電の維持と高速炉・燃料サイクルの構築における 高レベル廃棄物の消滅処理

これまでの計画

軽水炉→高速増殖炉→燃料サイクル

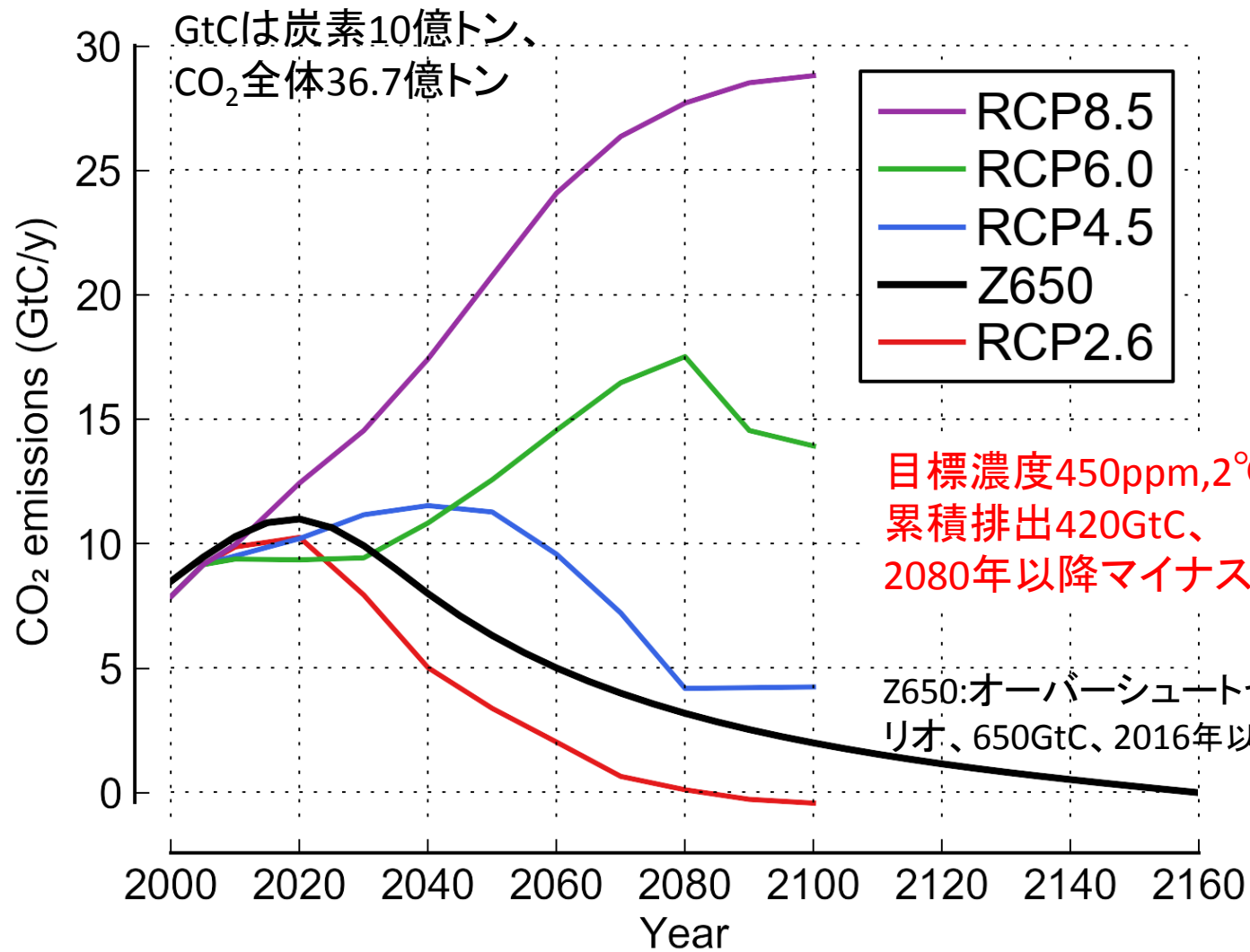
- 高速増殖炉 実用炉戦略研究フェーズ I (~2000), 同フェーズ II (~2005), 実用炉概念設計とR&D(2006~), 高速増殖炉サイクルの実用化像と開発計画(2015) 2025年頃実証炉 2050年頃商業ベースでの本格導入
- 実用化高速炉概念①ナトリウム冷却炉②ヘリウムガス冷却炉③鉛ビスマス冷却高速炉④軽水冷却炉
- 再処理と燃料: 湿式(溶媒抽出)と乾式(電解), MOX燃料、金属燃料, 窒化物燃料
- 技術総括(主概念)ナトリウム冷却炉(MOX燃料)湿式再処理とペレット法燃料製造 (補間概念)ナトリウム冷却(金属燃料)、ヘリウム冷却炉(窒化物被覆粒子燃料)
- →主概念の実用化を目指す開発へ、金属燃料と乾式再処理は基礎的なR&D(電中研にて実施)。
- 2006年「高速増殖炉サイクル実用化研究開発」(FaCTプロジェクト)がスタートし、2015年に実用化に至る計画提示。
- 原子力立国計画: 実証炉2015年頃までに実現、2050年商業ベースの高速増殖炉導入。

福島事故後の政策と課題

- 福島事故による安全規制の強化は国際的な動向。その動向に沿った見直しを実施中。
- 新しいエネルギー基本計画が見直されて、原子力発電(軽水炉)を維持し、燃料サイクルを推進し、高速炉による消滅処理の開発も進められる事となった。
国際的な安全基準のみ直しは、我が国のこれまでの高速増殖炉計画の見直しをも要請している。
- 長半減期核種(マイナーアクチニド)の使用済燃料からの分離・除去(湿式法)し、高速中性子による核分裂によって消滅処理する開発は、どのような規模を目標として、どのような長期的なスケジュールで進められるべきか。
- 燃料サイクルの推進は、軽水炉の使用済燃料再処理と長期的なエネルギー構成の見直しから、高速増殖炉の導入をどのようなスケジュールと規模で進めるべきか。

気候変動枠組み協議は新しい段階を迎え、 実現可能な方向を目指している

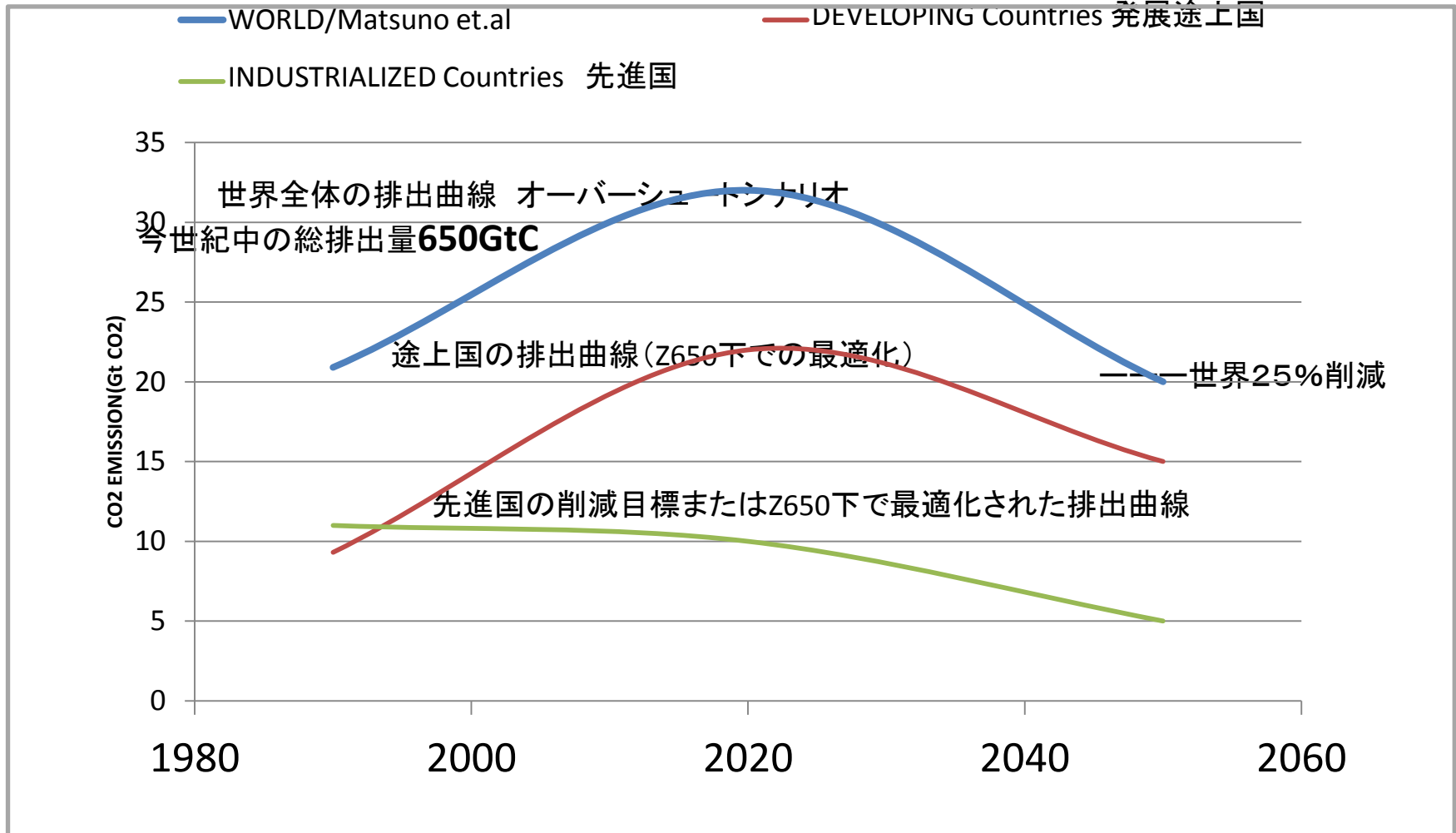
1. 世界で共有する温室効果ガスGHGの排出シナリオの検討で濃度安定化に対して**オーバーシュート・シナリオ**が検討されるようになってきている(IPCC 第5次評価報告書等)。
2. 今世紀末までの**総排出量**が温暖化の決め手となる重要な指標(同)。
3. 千年程度かけて収束する温度上昇と今世紀末までの温度上昇を区別する。**2°C**(3000年で収束する) → **過渡的溫度上昇2100年で1.6°C**
4. そのシナリオの制約のもとに、平均温度上昇 2°C以下とし、**世界全体でコストミニマムで最適化する** エネルギー構成とそれによる二酸化炭素の排出が共有されるべき目標である(オーバーシュート・ゼロエミッション・シナリオ、2050年世界で25%削減、2100年80%削減、2150年ゼロエミッション・シナリオ)
5. 世界全体コストミニマムとする長期エネルギー構成は、化石燃料:原子力:再エネの**経済性(投資とバランス)**によって定める。
6. **低炭素技術の開発と普及**が不可欠である。特に、高効率でクリーンな火力発電技術とCCS、再生可能エネルギーの大規模な導入を可能にするシステム、**原子力エネルギー利用技術、および産業用プロセスヒートの低炭素化**が不可欠である。継続的なイノベーションを推進する取り組みと普及の仕組みが必要。
7. 2030年における日本のエネルギー構成(CO₂ 0%削減)にとって、高効率な火力発電の推進、原子力発電の維持、再生可能エネルギーの大規模な導入のバランスによって、地球環境・経済性・安定性を確保でき、高度に発達した産業社会のあり方をアジア発展途上国に示す。
8. **国際協力による低炭素エネルギー技術の開発と普及**が重要。二国間オフセットクレジット制度に加え、強い補間関係にある日米中による温暖化抑制のための協力関係を築く事が重要。また、途上国の成長にあわせた長期エネルギー構成計画に沿った、継続的支援と最新技術の迅速なる普及メカニズムが重要。



キヤノングローバル戦略研究所エネルギー研究会・国内シンポジウム2014
「電中研 筒井純一「IPCC AR5を踏まえたZ650の再検討」2014.7.24

世界が共有する排出シナリオ案 Z650

- 温暖化予測の科学(2°C)と先進国の削減曲線(2050年50%削減)が途上国の削減[気候変動予測の要求(2°C以下)]-[先進国の削減目標]=[途上国の排出曲線]



Result of Global Optimization

Global and regional CO₂ Emissions

Ratios to 2005 levels		2005	2030	2050
REF	World	1.0	1.5	1.6
Z650	World	1.0	1.2	0.75
	Industrialized countries	1.0	1.0	0.5
	US		1.0	0.5
	EU15		0.9	0.4
	Japan		0.8	0.5
	Developing countries		1.0	1.5
	China	1.5		0.8
	India	1.9		1.6
	ASEAN	1.6		1.5

Different reduction rates are needed depending on economic levels

世界の一次エネルギーの推移

Z650 制約下で世界全体最適化(コストミニマム=限界削減費用均等化)

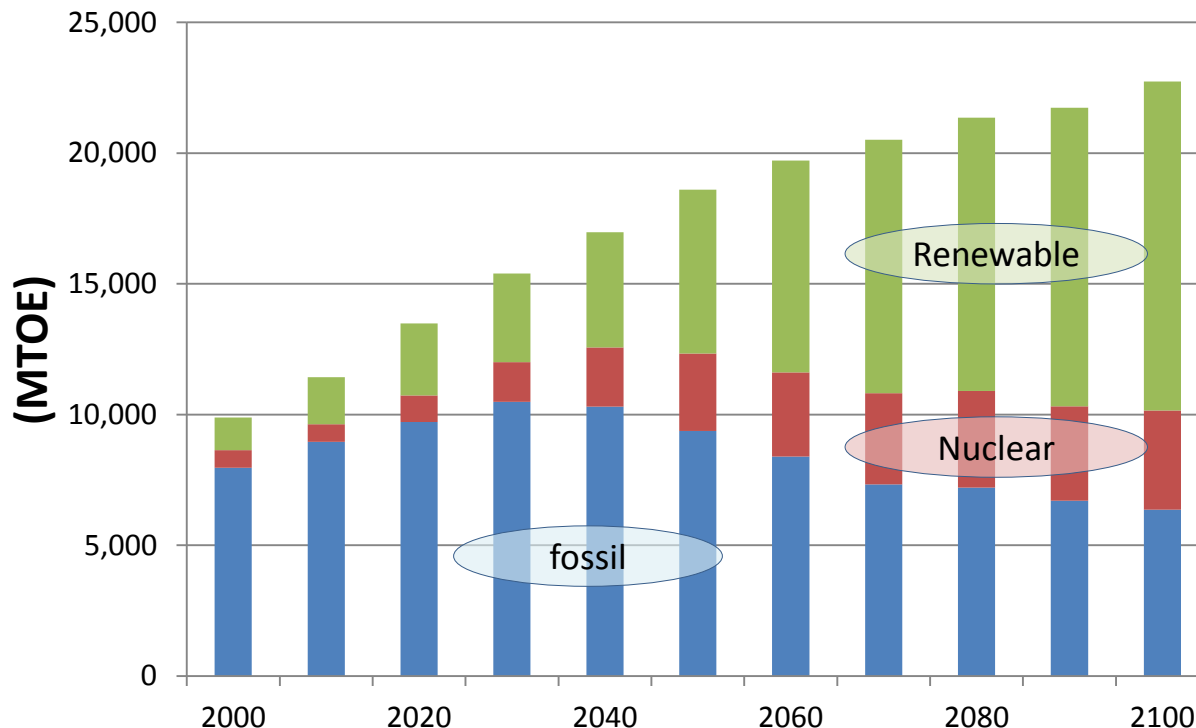
- 途上国を中心にエネルギー消費が急増していく中、二酸化炭素排出を削減していくためには、原子力、再生可能の着実な増加が必要



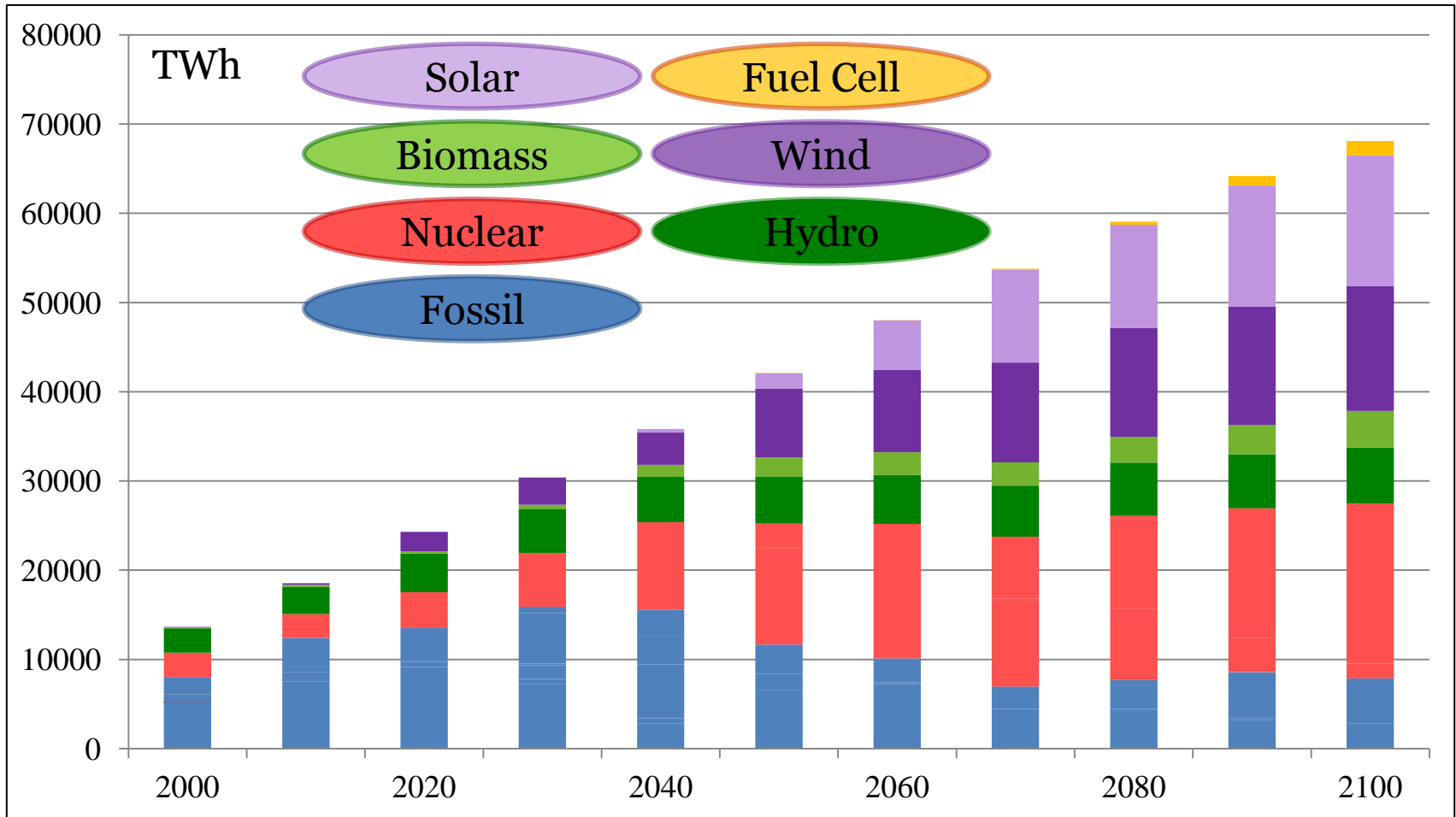
化石燃料 : 原子力 : 再エネ = 8.5 : 0.6 : 1.4 (2010実績)

5 : 2 : 3 (2050予測) ← 7:1:2(BAU,2050)

3 : 2 : 5 (2100予測) ← 6:1:3(BAU,2100)



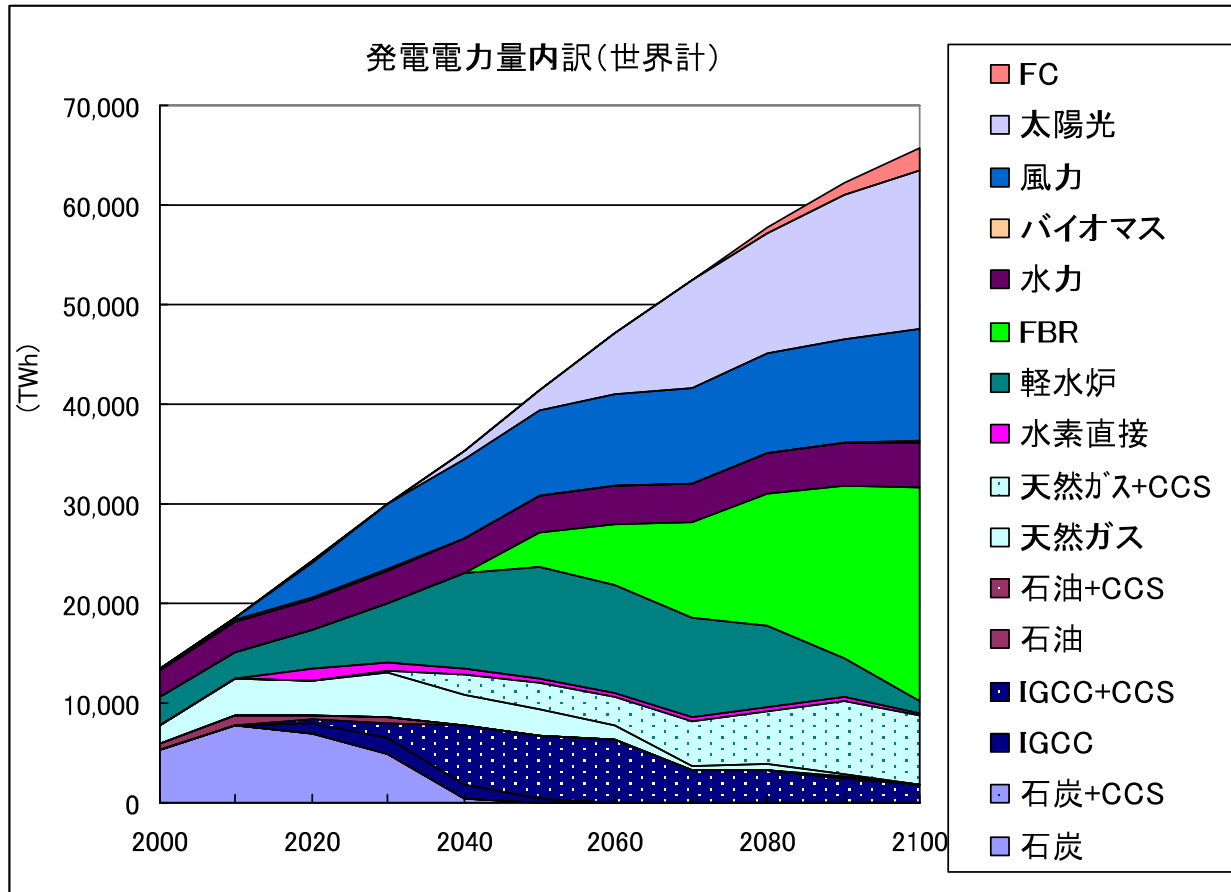
Electricity: Global Power Generation of Z650



Nuclear Power Capacity (GWe)	2000	2030	2050	2100
	370	810	1,800	2,600

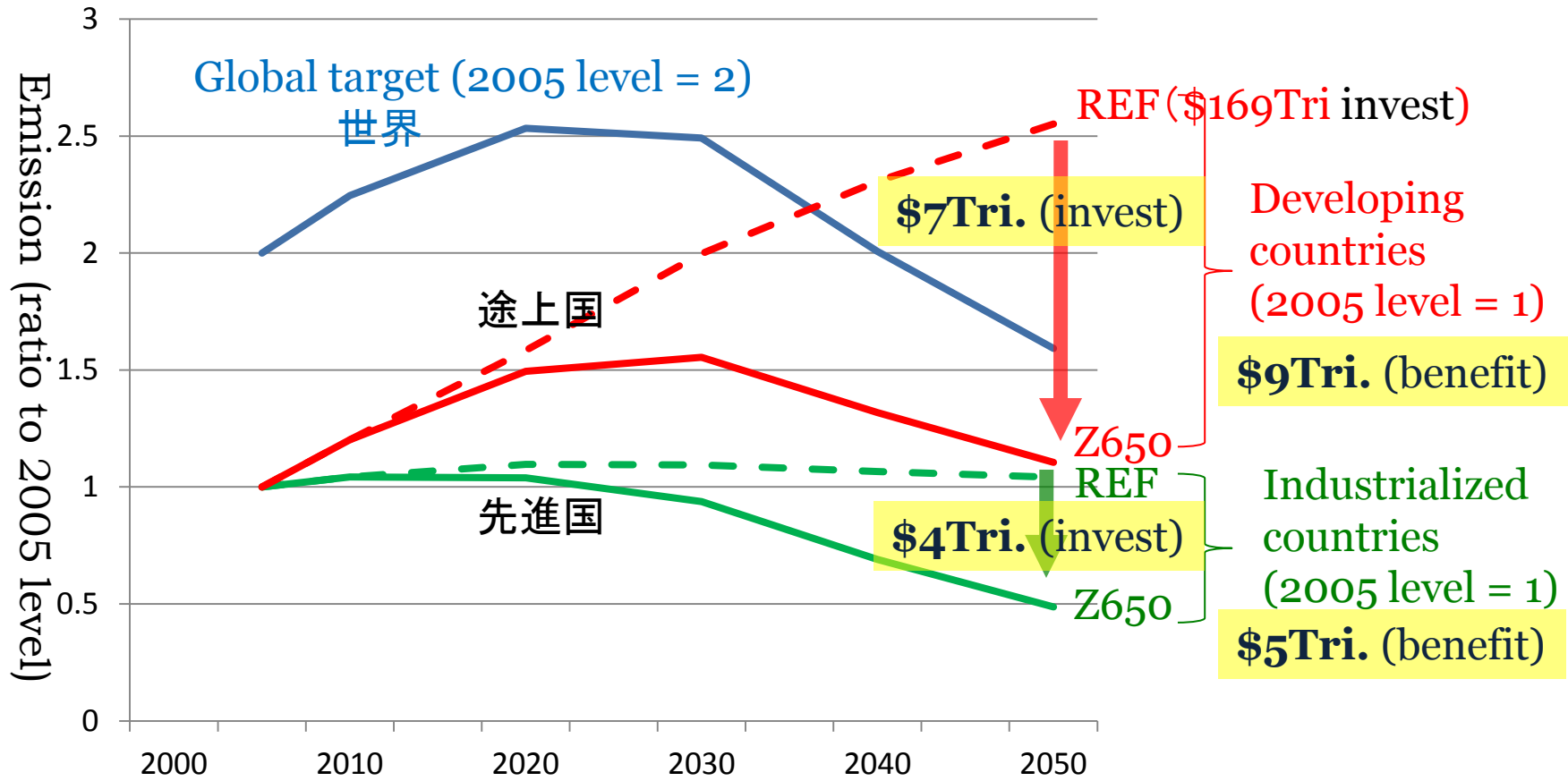
原子力、火力、再生可能エネルギーのバランス構成

- 「気候変動予測の要求(2°C以下/Z650)に対応する、世界全体のコストミニマムで最適化された電源構成(GRAPEによる長期シミュレーション)



Additional Investments vs. Fuel Saving Benefits

世界全体で最適化し、投資と燃料削減費がバランスするエネルギー構成となっている
 Global and regional emissions of Energy Related CO₂



註: \$1 Tri./40年間 = 25B\$/年 = 2兆円/年

先進国2050年80%削減ケースでは 追加投資**\$38Tri**、燃料削減メリット = **-\$10Tri**; 正味 **\$28Tri**のコスト増加

Cost and Benefit

Differences from REF Scenario

Nuclear phase-out, NoCCS

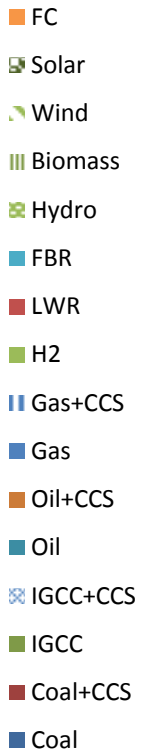
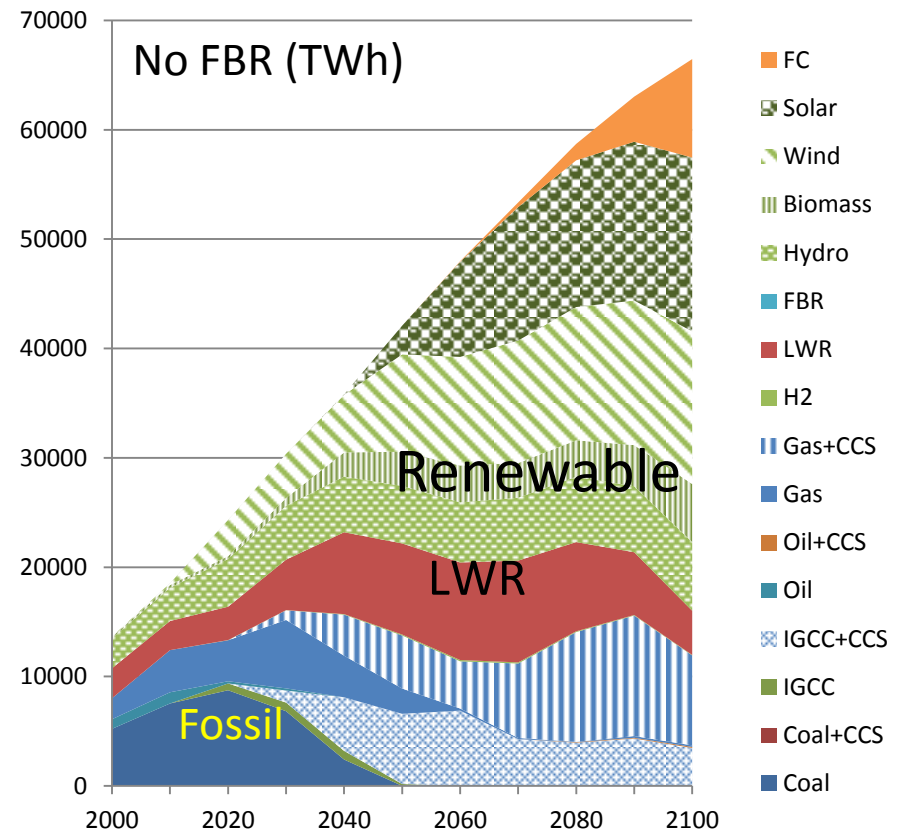
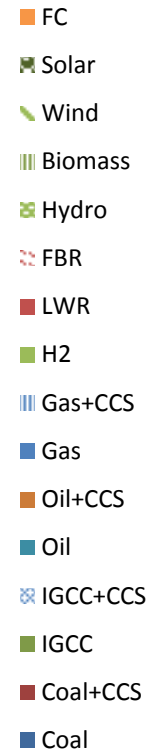
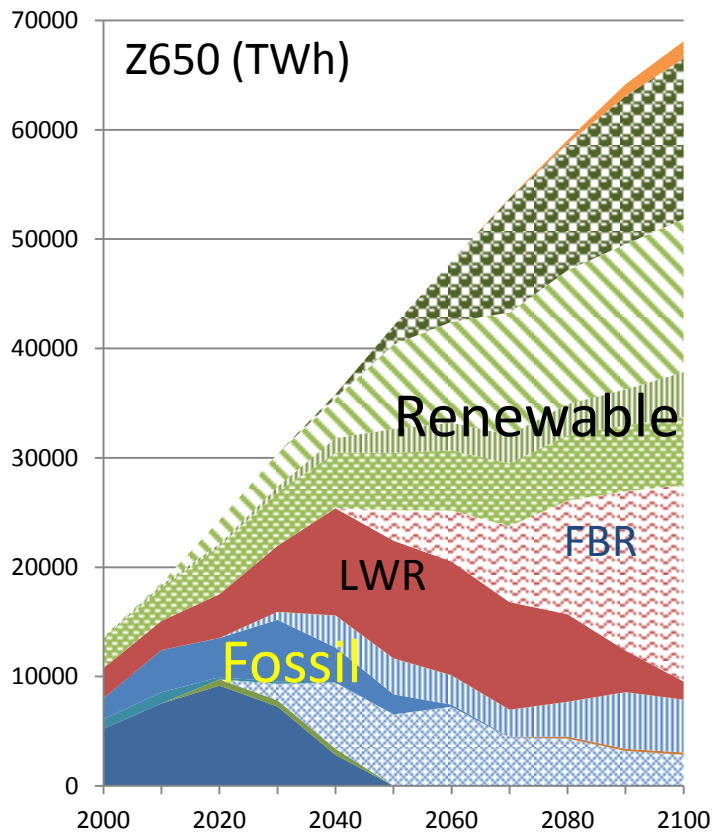
Unit : Trillion USD

	Emissions 2050 (ratios to 2005)	With Nuclear			Without Nuclear			Damage
		cost	benefit	total	cost	benefit	total	
World	0.75	11	-14	-3	17	-9	8	11
Developed	0.5	4	-5	-1	6	-5	1	2
Developing	1.1	7	-9	-2	11	-4	7	9
	Emissions 2050 (ratios to 2005)	With CCS			Without CCS			Damage
		cost	benefit	total	cost	benefit	total	
World	0.75	11	-14	-3	24	-17	7	10
Developed	0.5	4	-5	-1	7	-5	2	3
Developing	1.1	7	-9	-2	17	-12	5	7

- ①原子力フェーズアウトは、新興国・発展途上国に重い負担を課し、先進国の負担となる。
- ②CCS(二酸化炭素の隔離貯蔵)もまた大きな負担を途上国に課する事となる。

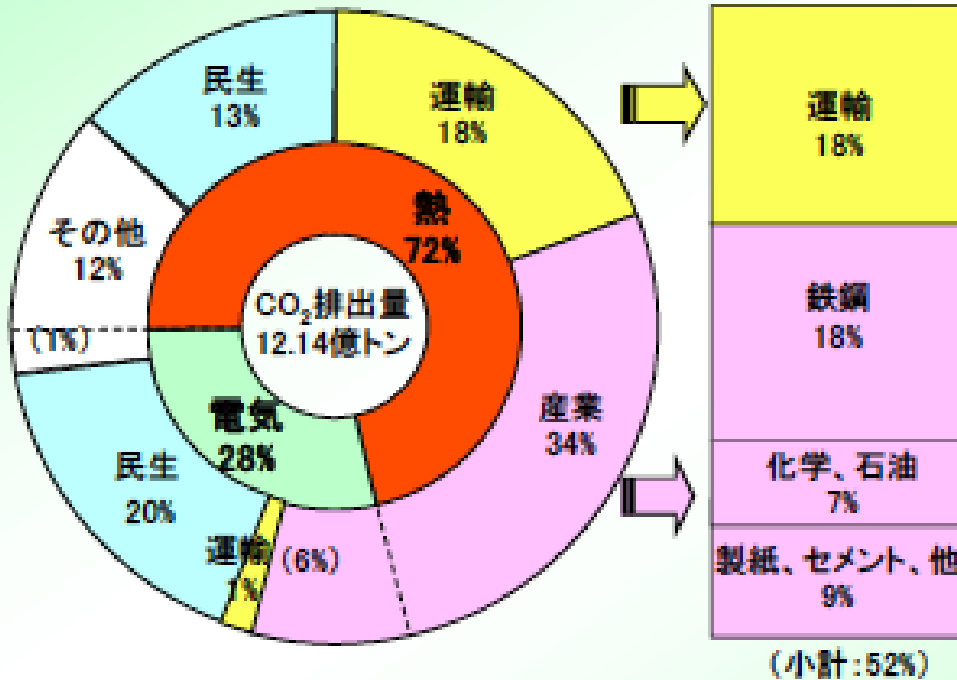
Effect of FBR (portfolio of electricity)

- Uranium resource is assumed by 15 million ton U (including undiscovered resource)
- FBR is important to sustain nuclear energy in this century



1. はじめに 我が国におけるCO₂排出量

部門別のCO₂排出量



我が国のCO₂排出量の約70%が熱利用分野に起因
(円グラフ: オレンジ色の部分)



熱利用分野での大量水素利用により、大幅なCO₂削減が可能

- ・運輸: 燃料電池自動車
- ・産業: 鉄鋼、化学、石油 等

(上記2分野の合計で全体の52%)

出典: 環境省 温室効果ガス排出量について(2008年度)

2030年日本の総一次エネルギー供給構成例

総一次エネルギー供給(石油換算百万ト、Mtoe)

単位:MTOE		石炭	石油	ガス	再生	原子力	合計	効率	CO ₂ 億トン 2005年比
総供給	2010	120	210	96	26	60	512	33%	12.0
		83%			5%	12%			
	2030 本案 CIGS	96	134	92	47	60	429	40%	9.5 -21%
		75%			11%	14%			
	2030 IEA*	99	140	84	53	57	434	?	9.2 -23%
		74%			12%	13%			

2030年日本の電力量TWhの構成 IEA WEO 2014との比較

	総発電量 TWh	化石燃料			原子力	再生可能エネルギー					
		石炭	石油	ガス		水力	太陽	風力	海洋	地熱	バイオ
2010	1006	252	75	295	292	86	11				
		62%			29%	9%					
2030 本案 CIGS	1000	235		325	240	91	29	33	15	10	22
		56%			24%	20%					
2030 IEA*	1119	296	25	293	218	98	72	36	1	21	61
		55%			19%	26%					

2030年日本のエネルギー構成(最終消費とエネルギー効率)

2030年における最終消費における便益・損失・エネルギー効率と最終消費量

最終消費		石炭	石油	ガス	再生	電力	合計	便益	損失	効率
産業	2010	37	64	17	3	34	158	93	65	59%
	2030	31	59	14	6	33	143	93	50	65%
民生	2010		28	17	1	51	97	63	34	65%
	2030		13	14	2	50	79	63	24	80%
運輸	2010		82			2	84	15	69	18%
	2030		44		3	3	50	15	35	30%

*2. 便益は各セクターの活動量の予測(中期目標検討委員会・国立環境研究所資料, 資源エネルギー庁資料など)に基づき各セクターとも2030年はほぼ2010年時を維持すると想定、また効率の設定は東京大学トリプルフィフティの設定値を引用。*3 電力化率2030年(改)ケースで 供給51%(最終需要30%)

活動量に対して原単位改善で産業10%、民生23%、運輸66%を想定

原子力エネルギー利用の維持

1. ウラン資源の有限性

- ・軽水炉から高速増殖炉への移行によって持続可能な燃料資源へ

2. 原子力炉の安全性

- ・福島事故を踏まえて、全電源喪失事故を回避するとともに、全電源喪失しても炉心溶融事故を回避する。
- ・固有な安全性を有する高温ガス炉の開発(多目的)

3. 高レベル廃棄物の最終処分

- ・使用済み燃料を再処理し、燃料を作り、高レベル廃棄物はガラス固化し、地層処分。
- ・高レベル廃棄物を減容化し、低レベル化する技術開発を進める。

4. 原子力技術の自主開発問題(自主開発が産業競争力であり人材教育の核である)

- ・軽水炉: ①導入技術(60年代後半から)②改良型(90年代からABWR)③独自なかつ進化した「次世代軽水炉」を開発中。
- ・原子力船「むつ」の船用炉: 自主開発。(実航海で地球を2周し、必要なデータと実績)
- ・新型転換炉「ふげん」(重水炉): 実証炉迄自主開発し、長期運転終了し、廃炉研究へ。
- ・高速増殖炉: 実験炉「常陽」→原型炉「もんじゅ」。初期トラブルでの対応で長期停滞。
- ・高温ガス炉: 「研究炉HTTR」を開発運転中。水素製造システムを研究中。

原子炉の自主開発

型	名称	減速材・冷却剤	商業炉・実証炉など	日本の自主開発炉	備考	
熱中性子炉	ガス炉	黒鉛減速・炭酸ガス冷却 (商業化)	マグノックス炉等 (英国)	<input type="checkbox"/>	我国の原発初号機・東海一号炉	
	高温ガス炉	黒鉛減速・ヘリウム冷却	THTR(独)、HTGR(米) <input type="checkbox"/> HTR-PM 中国・実証炉建設中 <input type="checkbox"/>	HTTR (研究炉, 1998~) <input type="checkbox"/> → <input type="checkbox"/> リードプラント <input type="checkbox"/> (計画を協議中) <input type="checkbox"/>	固有な安全性 <input type="checkbox"/> NGNP(米、開発中) <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
	軽水炉 <input type="checkbox"/>	軽水減速・軽水冷却 <input type="checkbox"/> (商業化) <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	加圧水型軽水炉(PWR)	<input type="checkbox"/>	むつ(1974~、実証炉) <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	技術導入から次世代軽水炉を開発中
			<input type="checkbox"/> 船用炉(PWR) <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
			沸騰水型軽水炉(BWR)	<input type="checkbox"/>		
	重水炉	重水減速・重水冷却 商業化	CANDU	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	天然ウラン燃料	
重水減速・軽水冷却		新型転換炉	ふげん(1978~2003) <input type="checkbox"/>			
溶融塩炉	黒鉛減速・溶融塩冷却			<input type="checkbox"/>	米国-中国	
高速中性子炉	高速増殖炉 <input type="checkbox"/>	ナトリウム冷却高速炉 <input type="checkbox"/>	BN-600, 800(ロ)、欧米(<input type="checkbox"/> フランス実証炉スーパーフェニックス)、インド実証炉建設中 <input type="checkbox"/>	実験炉常陽(1977~)・ <input type="checkbox"/> 原型炉もんじゅ <input type="checkbox"/> (1994~)・実証炉(計画) <input type="checkbox"/>	ロシア商業炉BN1200を開発中 <input type="checkbox"/>	
		鉛ビスマス冷却高速炉	船用炉(ロ)潜水艦6隻			
		ヘリウム冷却高速増殖炉				EM²(GA)

本シンポジウムの目的(専門家の対話)

- 1. 気候変動問題と原子力エネルギー** (全体論:湯原)
 - ・世界と日本のGHG排出パスウェイと長期エネルギー構成
 - ・世界の長期的電源構成における原子力の役割
 - ・新しいエネルギー基本計画の方向性
- 2. 高温ガス炉の役割** (米国における開発の動向を米国NGNP & GA社から、日本の方向を岡本教授から)
 - ・固有な安全性と熱供給・水素製造
 - ・多目的高温ガス炉の開発
 - ・国際協力による開発
- 3. 燃料サイクルと高速炉の役割** (導入スケジュール等具体論 飯田氏)
 - ・軽水炉の維持と燃料サイクルの推進
 - ・高速増殖炉の役割と高レベル廃棄物処分
 - ・長期的な導入計画

目指すべきコンセンサス: 具体的展望

- ① 高温ガス炉開発における国際協力のあり方
- ② 燃料サイクルの維持と高速増殖炉導入計画の長期スケジュールと具体的規模