

大震災の教訓とエネルギー問題 の課題と解決策

2011年5月27日

東京大学生産技術研究所

特任教授 金子祥三

目次

1. 地震・津波による被災状況
2. 教訓：津波対策
3. 今後のエネルギーの動向：
火力発電と再生エネルギー
4. 火力発電：ダブル複合発電からトリプル発電へ
5. 再生エネルギー：地熱・波力・バイオマス
6. 安全・安心のために

JR仙台駅の状況



マスコミ資料より



2011.3.11 14:46
仙台で地震に遭遇

JR仙台駅前





2011.3.11 14:46

JR仙台駅前

1. 地震・津波による被災状況

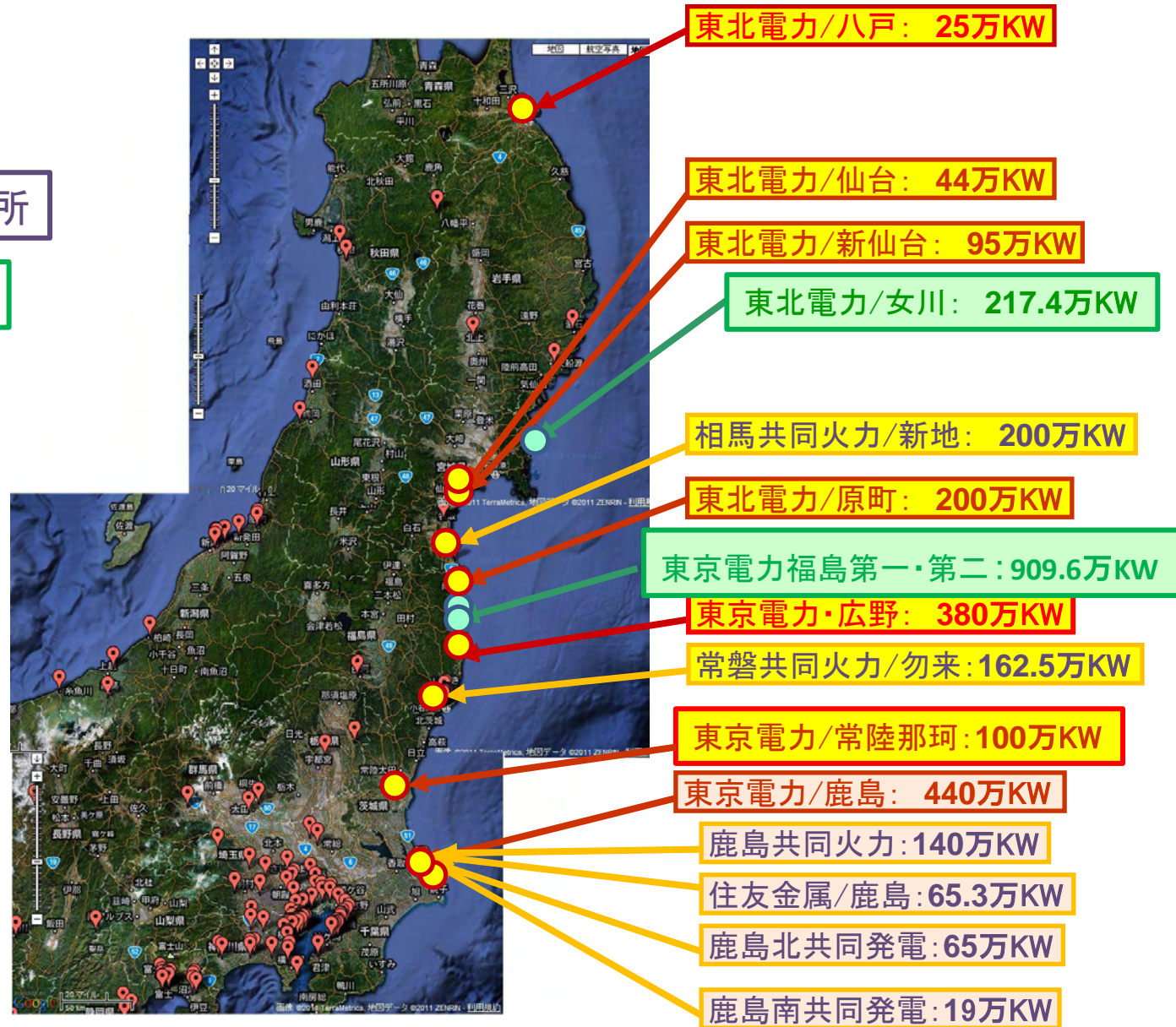
ほとんどの水没発電所の復旧は
半年から1年以上かかる！

1-1 発電設備の被災状況

1. 東日本太平洋岸の発電所はほとんど全部停止
2. 火力発電所は津波による浸水・冠水の被害
→復旧に3カ月～2年を要す
3. 大半の原子力発電所は低温停止状態
4. 東京電力福島第一発電所1～4号機が全電源喪失により低温停止に失敗、炉心燃料棒が熔融状態に
5. 今なお予断を許さず----冷却のための努力継続中

東北・関東主要発電設備と被災状況

- 火力発電所
- 共同火力発電所
- 原子力発電所



2011年3月末停止中の発電所(東京電力)

[原子力発電所]

- ・福島第一: 470万KW
- ・福島第二: 440万KW

合計 910万KW

1830万KW

[火力発電所]

- ・広野 (重油・石炭): 380万KW
- ・常陸那珂 (石炭): 100万KW
- ・鹿島 (重油): 440万kW

合計 920万kW

4月20日復旧: 380万KW

停止中原子力・火力 = 1830万KW / 総発電能力6000万KW = 30%を喪失

- [共同火力分]
- 相馬共同火力新地(石炭): $200\text{万kW} \times 1/2 = 100\text{万kW}$
 - 常磐共同火力勿来(石炭): $162\text{万kW} \times 1/2 = 81\text{万kW}$
 - CCP: IGCC(石炭) : 25万KW

合計 206万KW

7月復旧に向けて必至の
努力が続けられている!

合計2006万KW / 6000万KW = 33%

火力発電所被災例:

株式会社クリーンコールパワー研究所

石炭ガス化複合発電(IGCC)実証機: 25万KW



石炭ガス化炉

排熱回収ボイラ
と煙突

常磐共同火力の
6,7号ユニット

3m

発電所の地面: 海拔3m!
(防波堤: 2m)

福島県いわき市

小名浜港

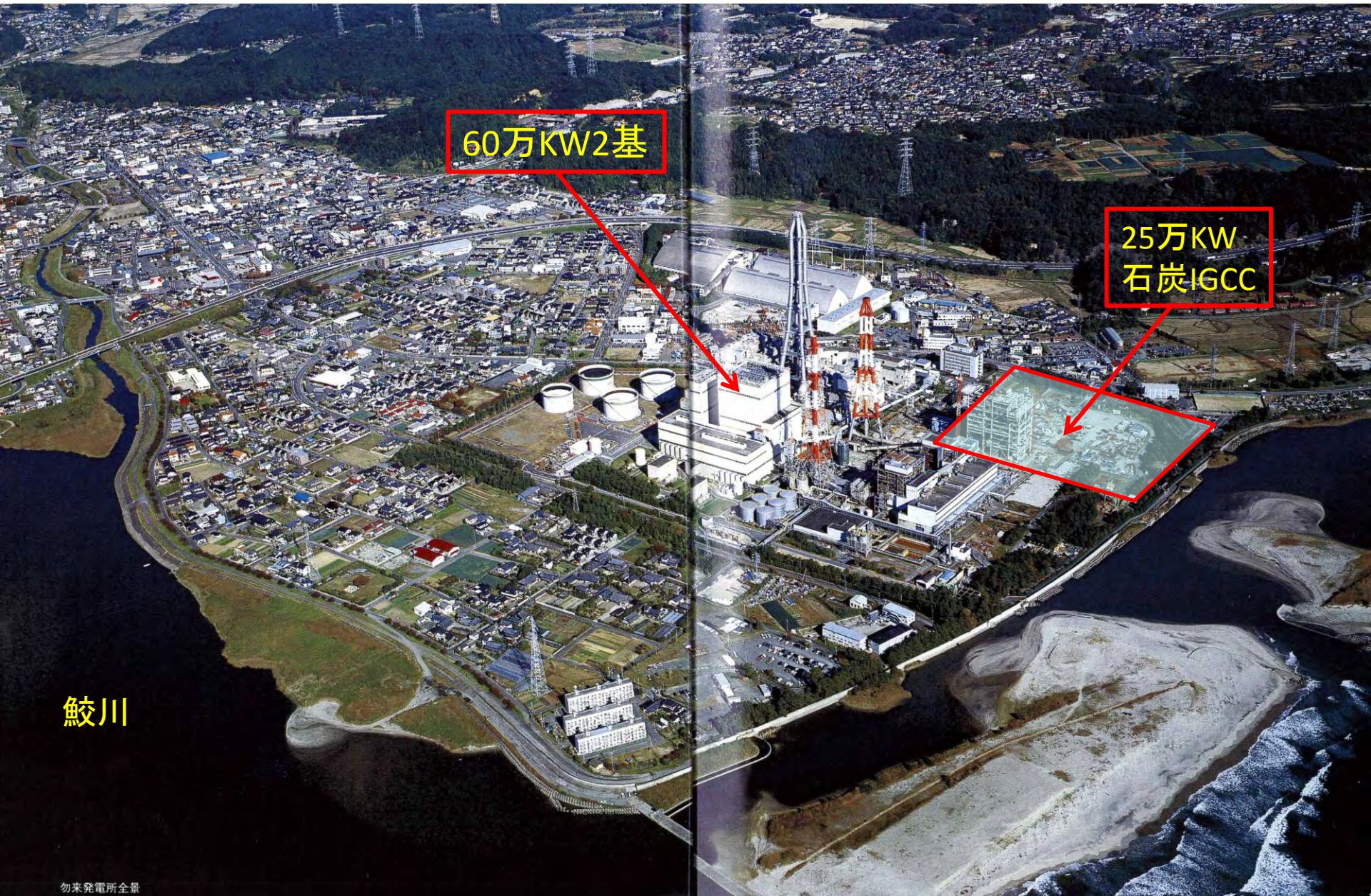
常磐共同火力
勿来発電所

IGCC

鮫川



常磐共同火力勿来発電所と石炭ガス化複合発電(IGCC)

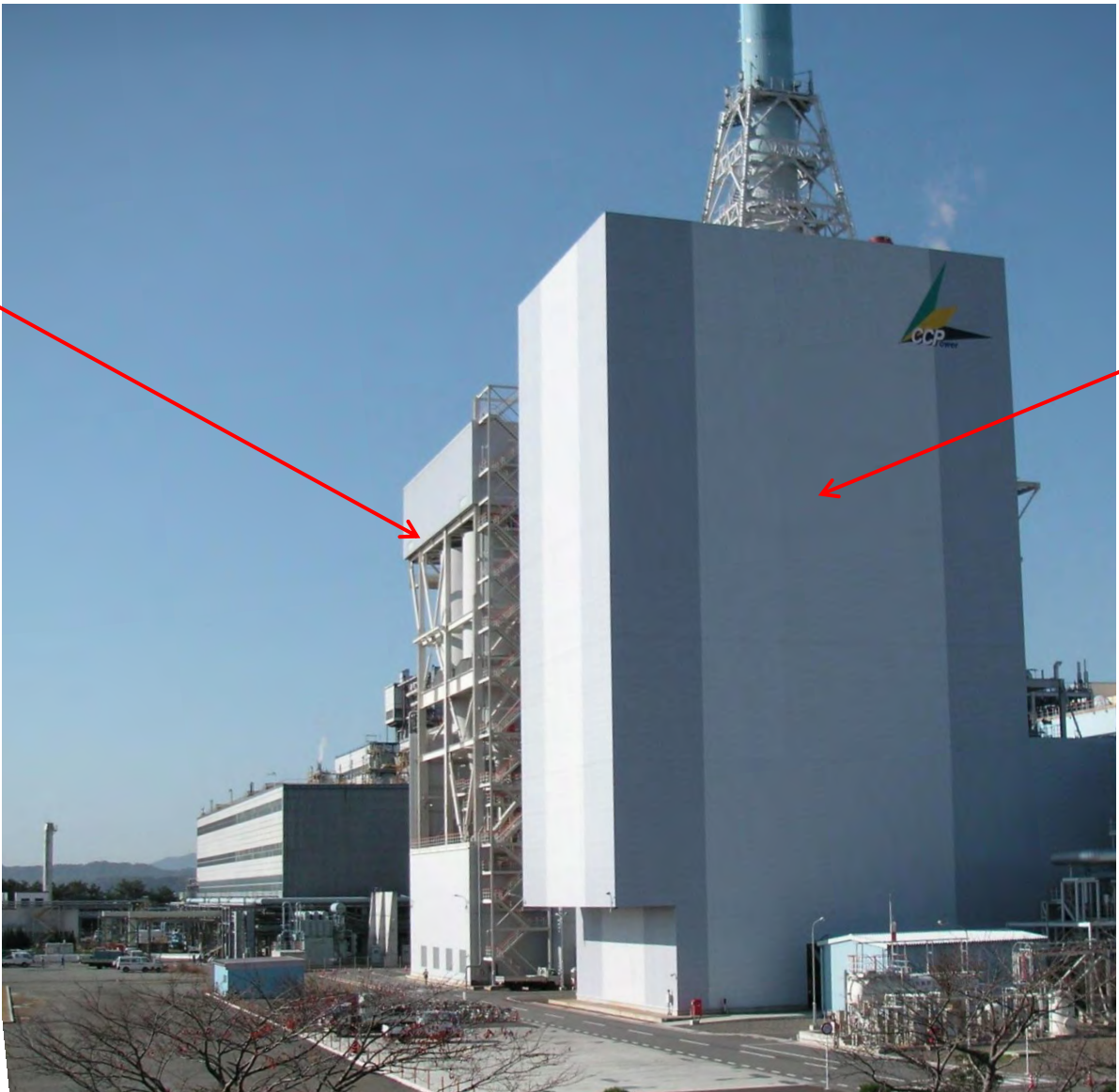


60万KW2基

25万KW
石炭IGCC

鯨川

勿来発電所全景



石炭ガス化炉

排熱回収ボイラ

25万KW IGCC実証機

Courtesy of Clean Coal Power R&D Co.

津波来襲！



Photo : Courtesy of Clean Coal Power R&D Co.





被災直後の状況

Courtesy of Clean Coal Power R&D Co.



補機棟建屋

空気分離装置
コールドボックス

窒素タンク

石炭コンベヤ

空気冷却器 (海水冷却)

防音壁

石炭ガス化複合発電 (IGCC) 実証機 25万KW

Courtesy of Clean Coal Power R&D Co.

被災直後の状況



Courtesy of Clean Coal Power R&D Co.

被災直後の状況



Courtesy of Clean Coal Power R&D Co.

被災直後の状況



Courtesy of Clean Coal Power R&D Co.



被災直後の状況



Courtesy of Clean Coal Power R&D Co.

被災直後の状況



Courtesy of Clean Coal Power R&D Co.



復旧後の現況

Courtesy of Clean Coal Power R&D Co.

復旧後の現況



Courtesy of Clean Coal Power R&D Co.

現在の状況---7月には運転再開予定！



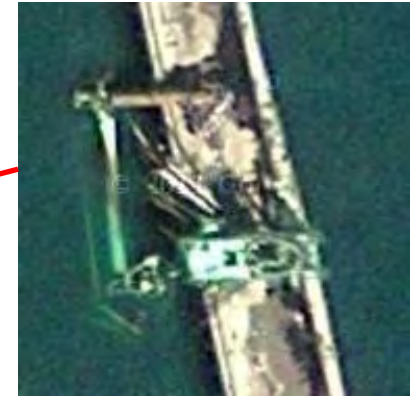
Courtesy of Clean Coal Power R&D Co.

東京電力 広野火力発電所に津波が襲う瞬間



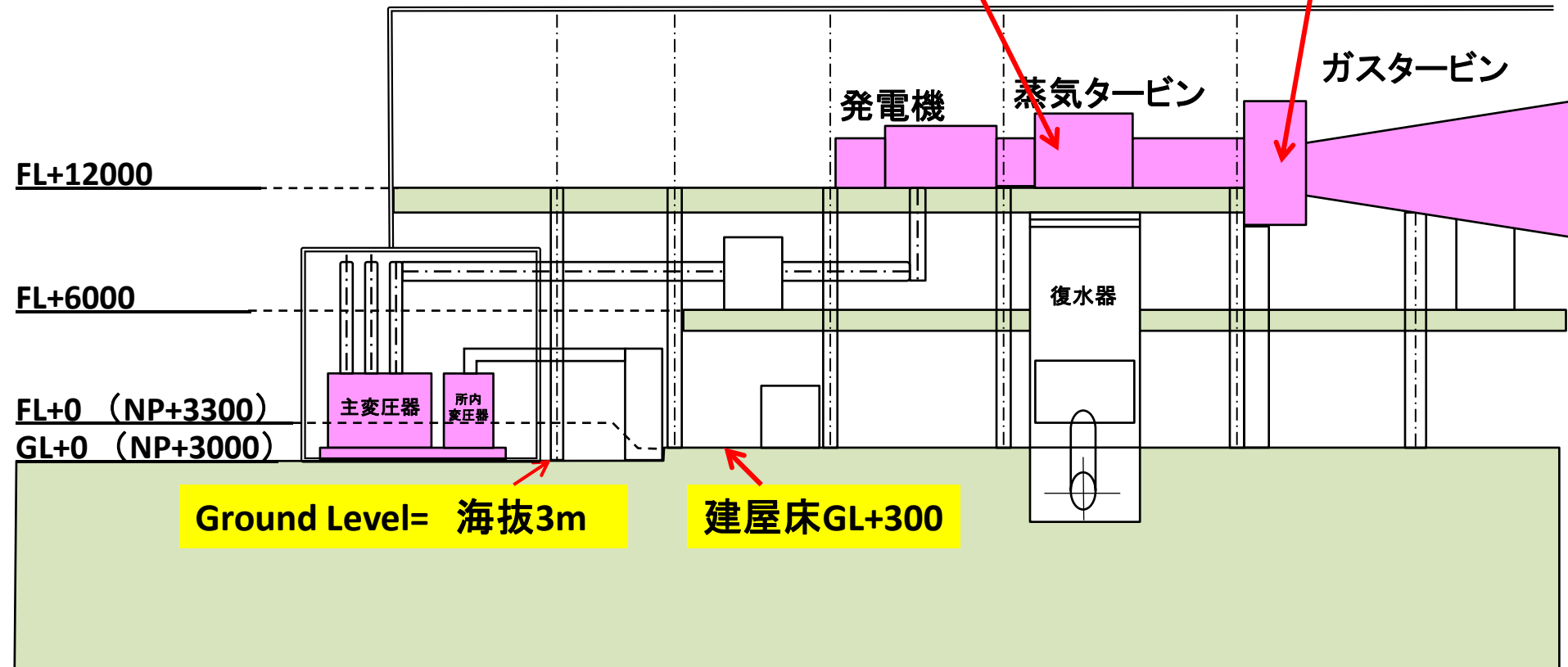
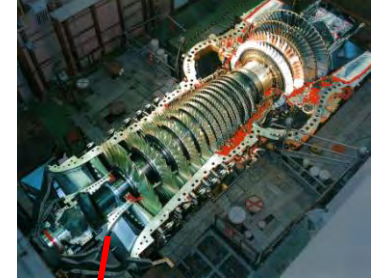
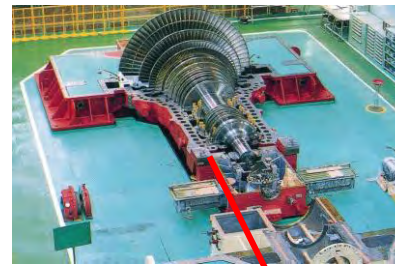
totallycoolpix.comより

東北電力 原町火力発電所



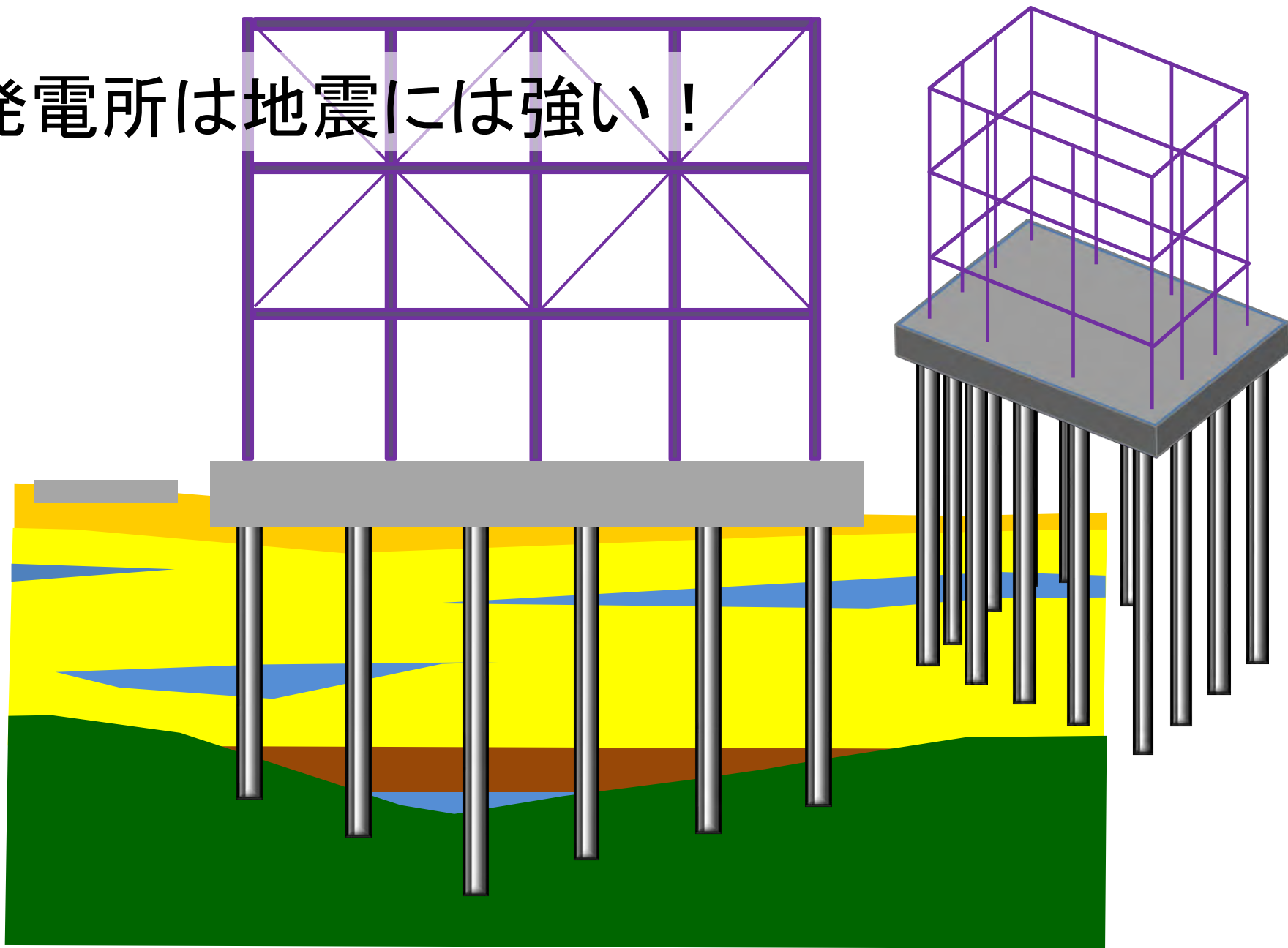
Googleマップより

ガスタービン、蒸気タービン 発電機などの主要機器は+12m

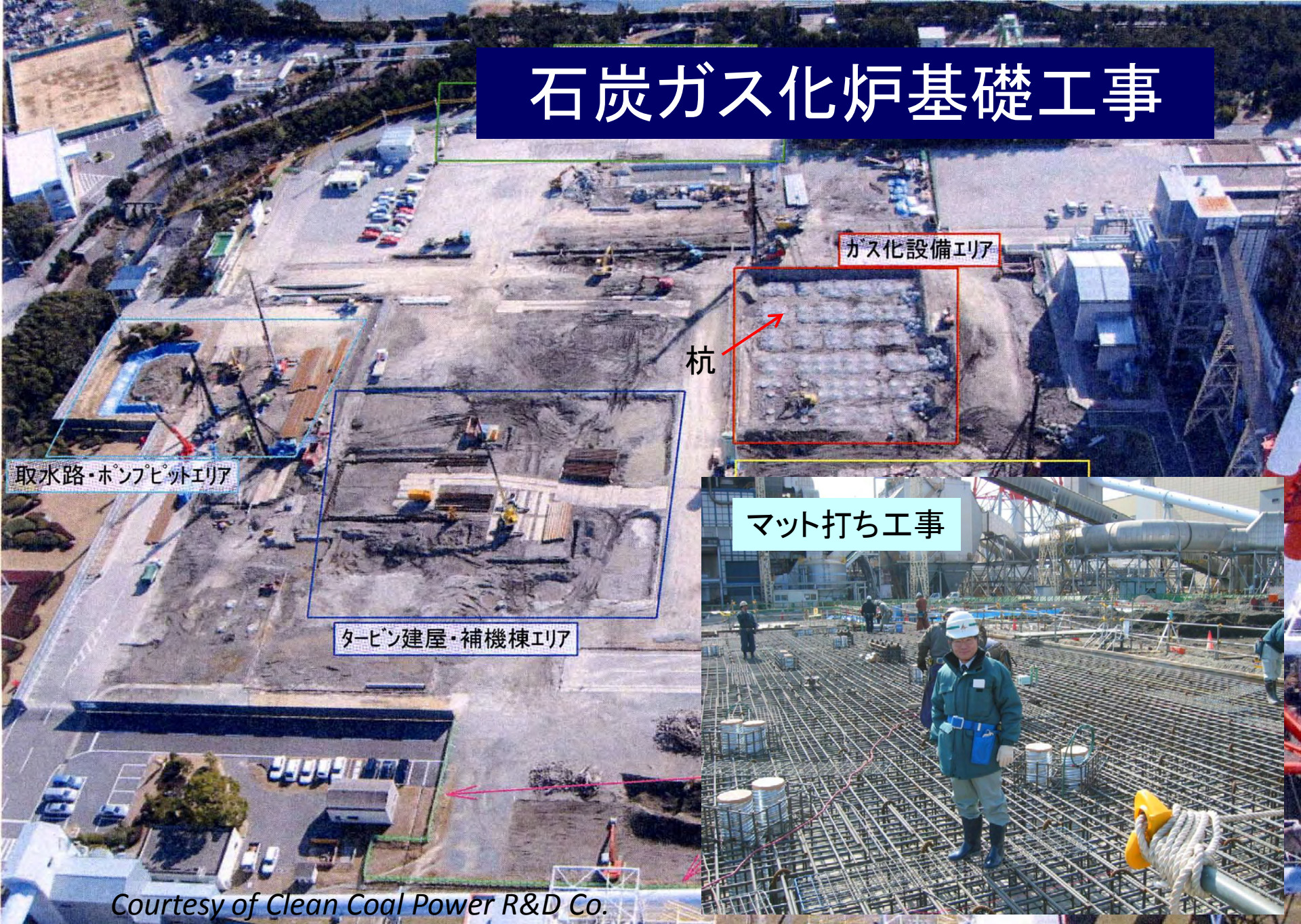


発電所の地面は海拔3mしか無い！

発電所は地震には強い！



石炭ガス化炉基礎工事



Courtesy of Clean Coal Power R&D Co.

2. 教訓：津波対策

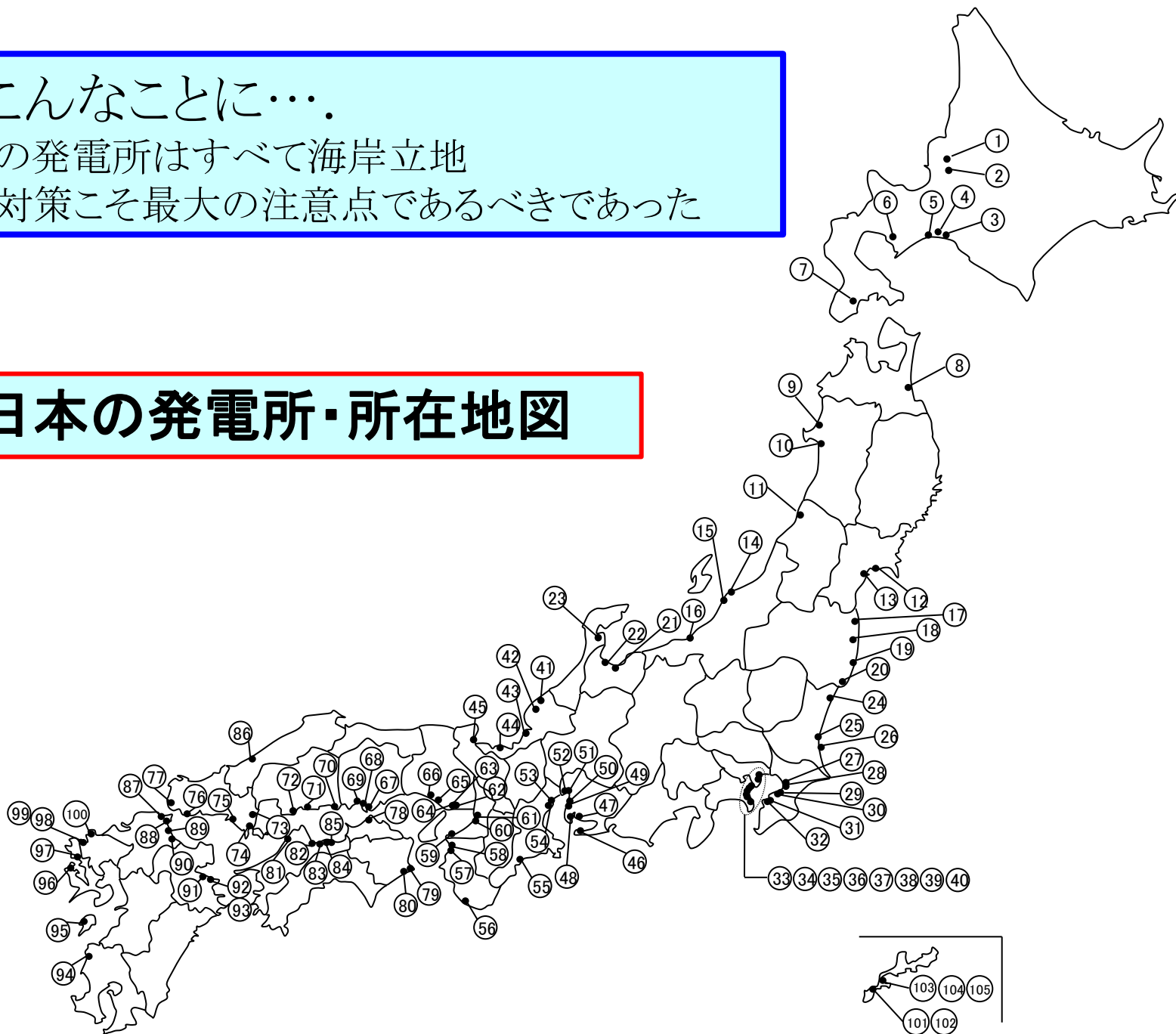
➤ほとんどの発電所の被害は
地震より津波によるものである！

なぜこんなことに….

→日本の発電所はすべて海岸立地

→津波対策こそ最大の注意点であるべきであった

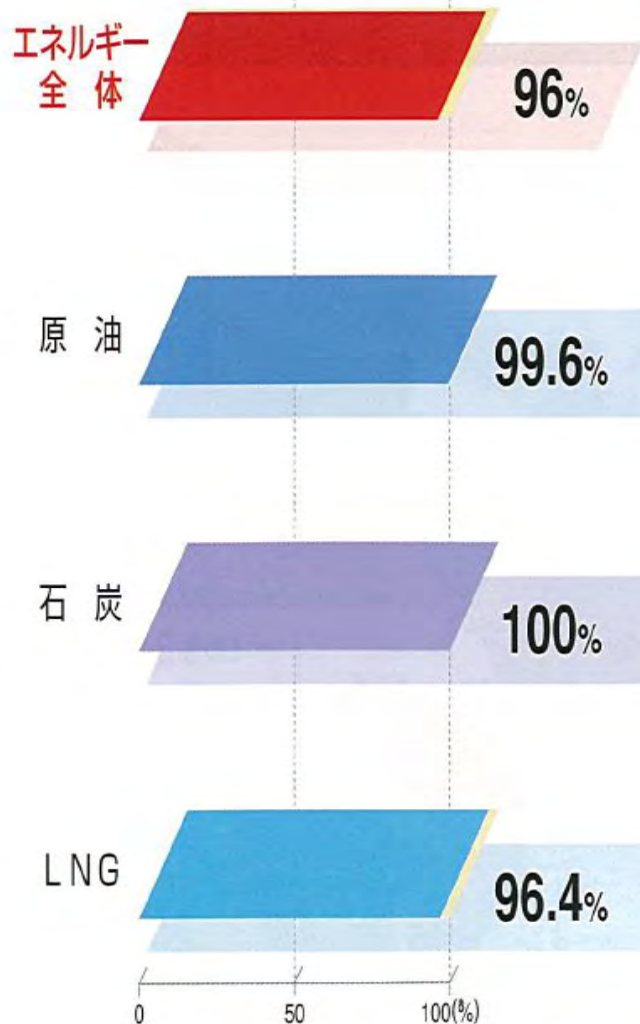
日本の発電所・所在地図



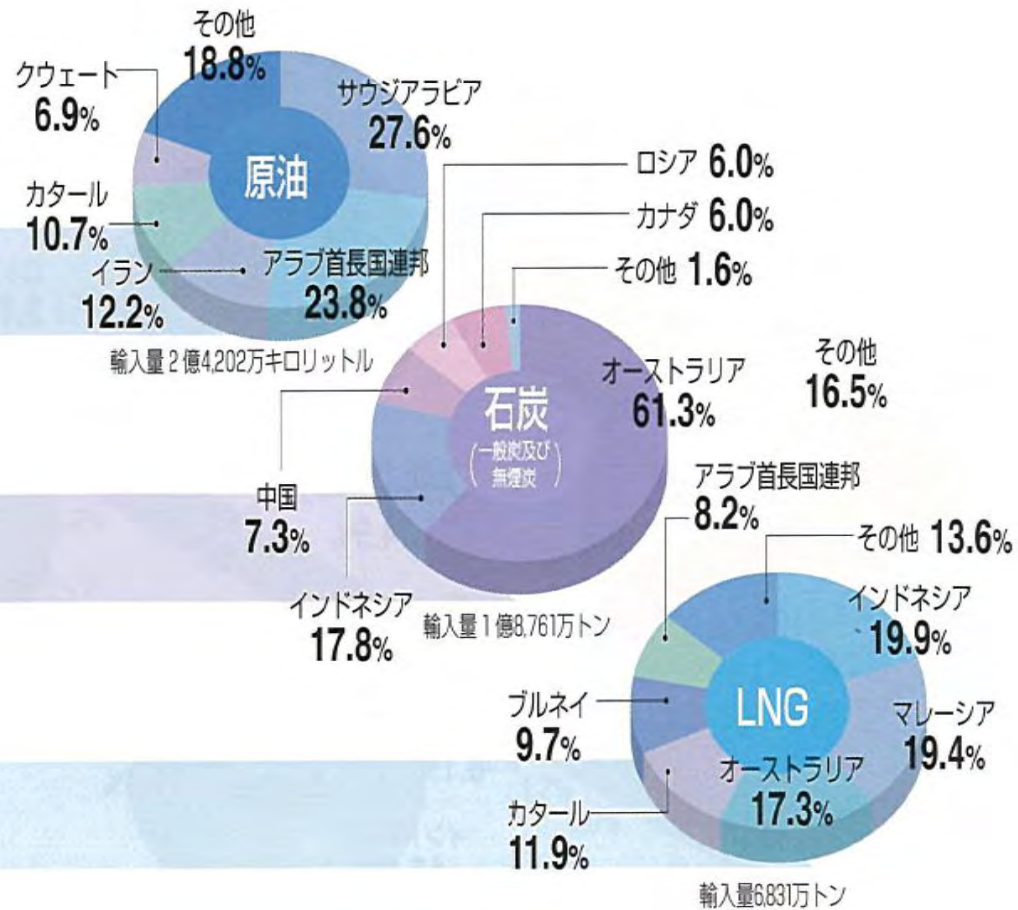
日本のエネルギーの海外依存度 (2007年度)

エネルギー源のほとんどが輸入

エネルギー原料の輸入依存度 (2007年度)



エネルギー原料の主な輸入先 (2007年度)



出典: 「エネルギー白書」 2009年版

※SHIPPING NOW 2009-2010より引用



日本の発電所:すべて海水冷却—海岸立地

海外の発電所は内陸が多い
→冷却塔で冷却



日本で冷却塔を使っているのは地熱発電：
東北電力澄川地熱発電所



福島第一原子力発電所の問題

1. 今回の最大の問題は燃料棒冷却の“冷却能力”喪失
2. 3つの電源すべて喪失:
 - ①発電所全ユニット停止
 - ②外部電源喪失(変電所地震で破壊)
 - ③非常用電源喪失(ディーゼル発電機運転不能)
3. 発電所の敷地高さと配置(補機の海岸寄り配置)が運命を分けた可能性あり

現在、現地で必至の努力が続けられている！

総力を挙げた支援策を！



原子力発電所の津波

女川原発 13m

天国と地獄
何が運命を分けたのか？

福島第一 14m



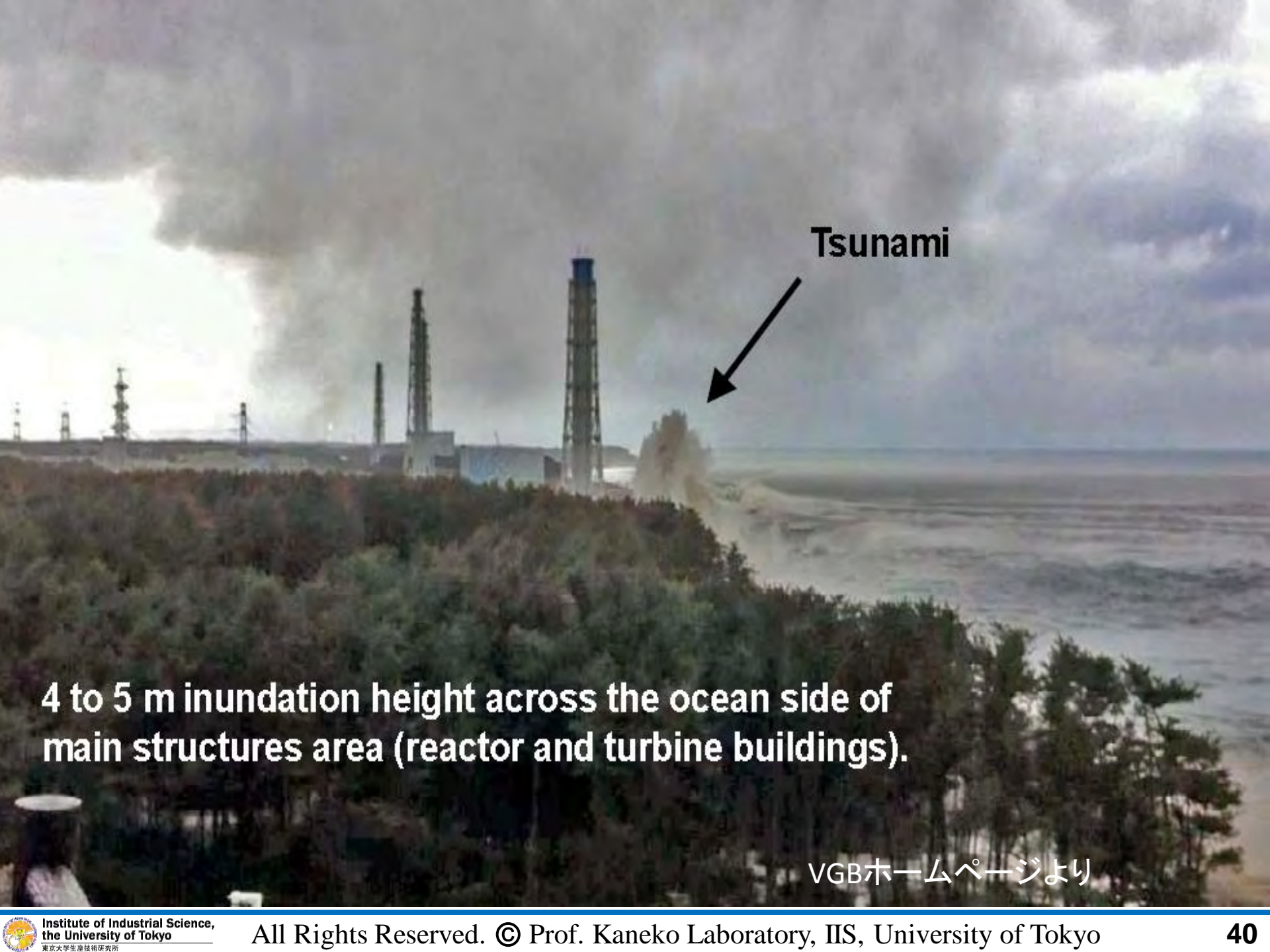
東北電力女川原子力発電所:出力 217.4万KW BWR (Mark-1)
(1号機:52.4万KW、1984.6 運開
2号機:82.5万KW、1995.7運開、3号機:82.5万KW、2002.1運開)

想定津波高さ: 7.5m
敷地高さ: 15m
実際津波高さ: 13m



東京電力福島第一発電所： 469.6万KW BWR (Mark-1)
(1号機：46万KW：2,3,4,5号機：4 × 78.4万KW：6号機：110万kW)

想定津波高さ： 5.7m
敷地高さ： 10m
実際津波高さ： 14m

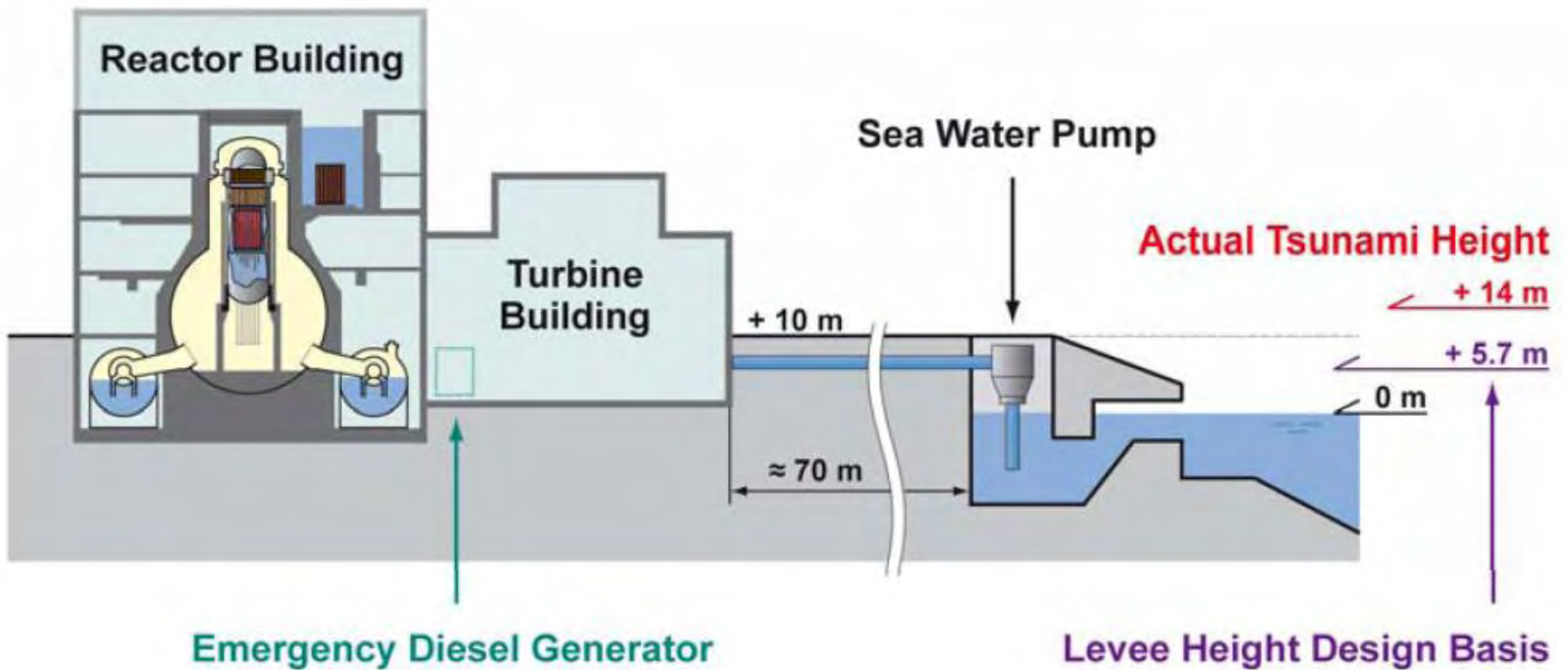


Tsunami



4 to 5 m inundation height across the ocean side of main structures area (reactor and turbine buildings).

VGBホームページより



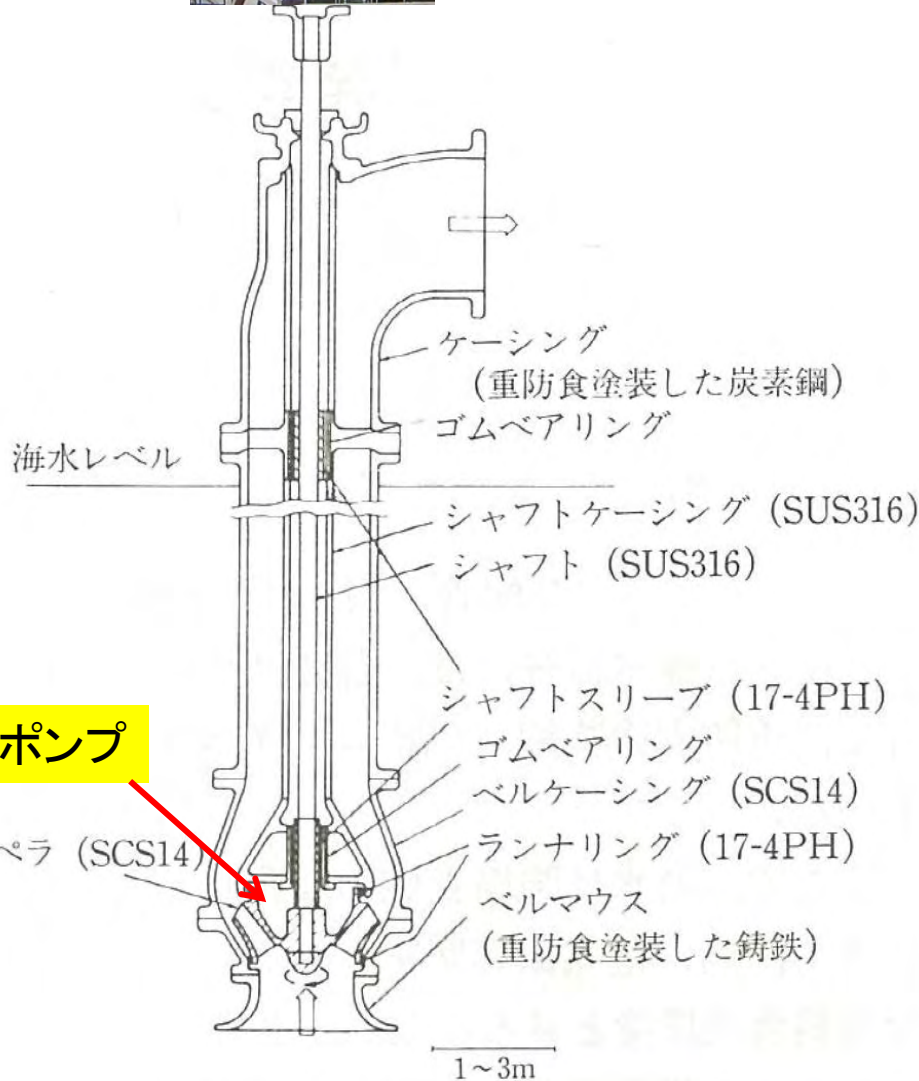
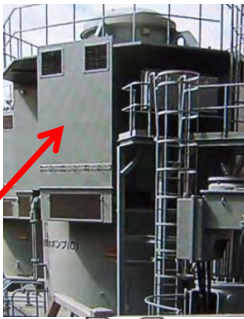
VGBホームページより



NHKニュースより

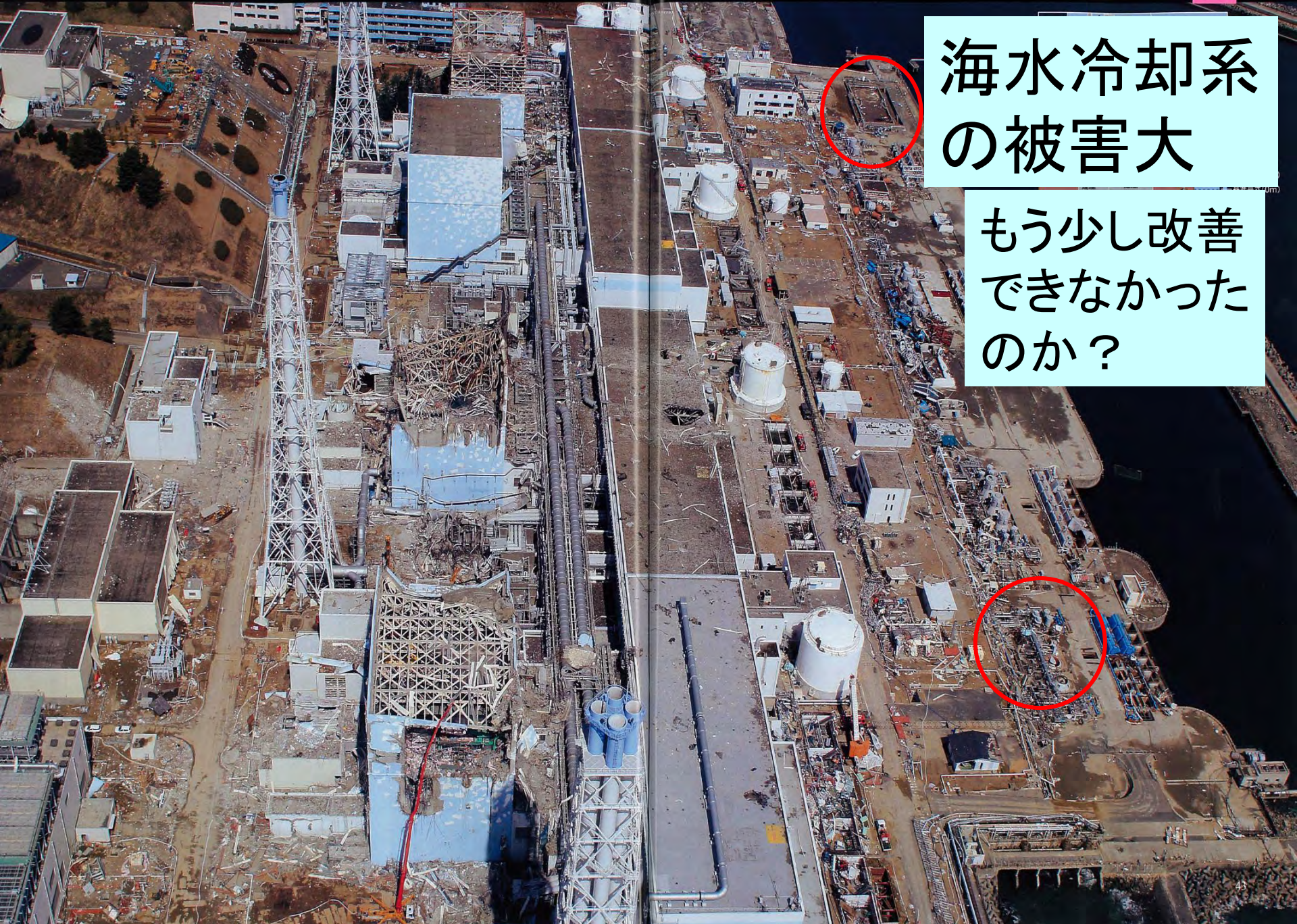
(海水)循環水ポンプCWP

電動機



ポンプ





海水冷却系の の被害大

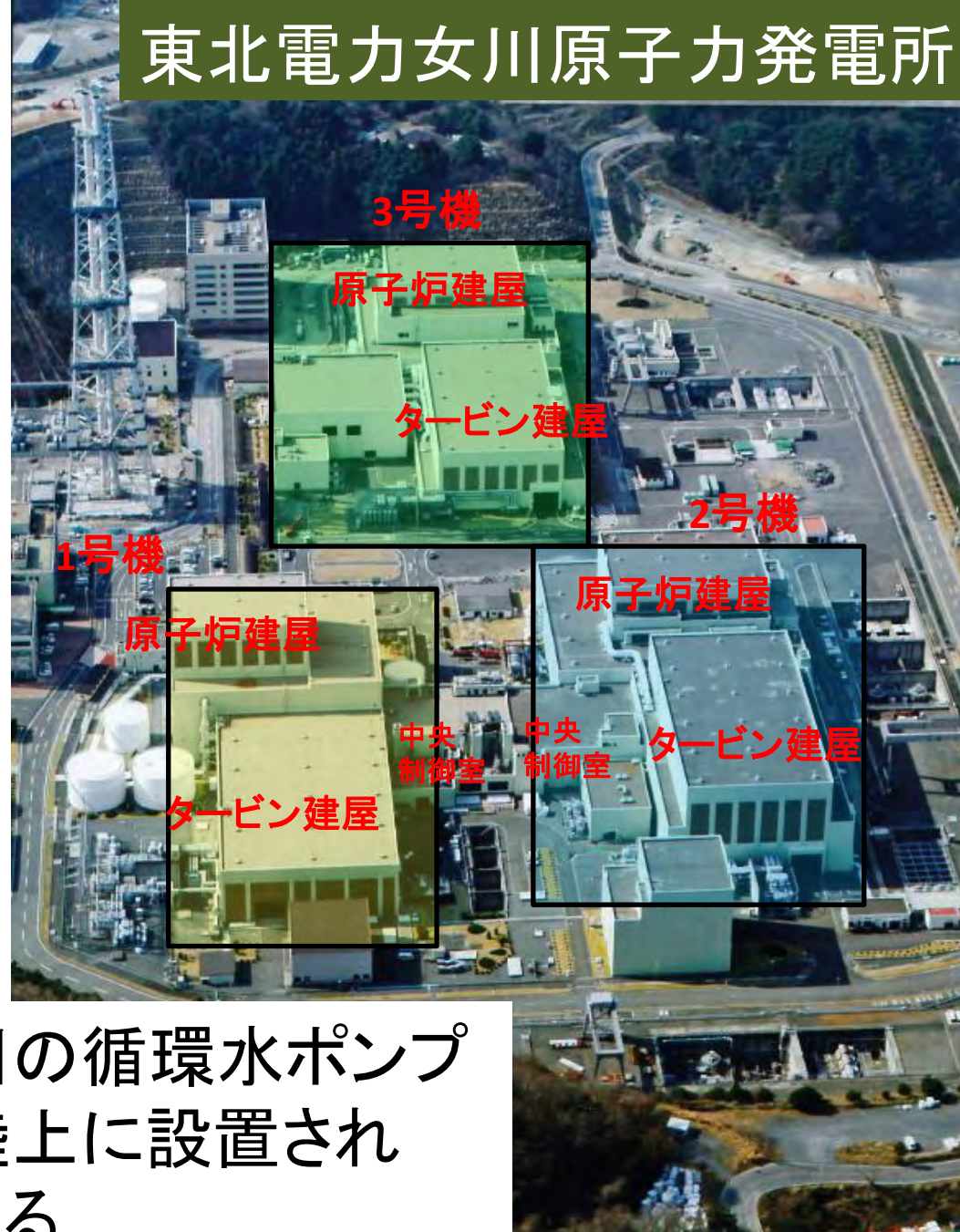
もう少し改善
できなかつた
のか？



NHKニュース(2011.5.23)より

循環水ポンプと残留熱除去系海水ポンプ

東北電力女川原子力発電所



女川の循環水ポンプ
は陸上に設置され
ている

女川原発と福島第一原発の比較

電力会社	発電所名	最大出力 (MW)	ユニット No.	出力 (MW)	メーカー	型式	運転開始日	供給者							
								主契約者	アーキテクト エンジニア	原子炉系統	圧力容器	炉心	燃料	蒸気系統	タービン
東北電力	女川	2,174	1	524	東芝	BWR-4/MARK- I 型	1984/06	東芝	東芝	東芝	石播	東芝	JNF/NFI	東芝	東芝
			2	825	東芝	BWR-5/MARK- I 改良型	1995/07	東芝	東芝	東芝	石播	東芝	東芝/JNF	東芝	東芝
			3	825	東芝	BWR-5/MARK- I 改良型	2002/01	東芝/日立	東芝	東芝	石播	東芝	東芝/GNF-J	日立	日立
東京電力	福島第一	4,696	1	460	GE	BWR-3/MARK- I 型	1971/03	GE	EBASCO	GE/GETSCO	GE/GETSCO / 東芝/石播	GE/GETSCO	GE/JNF	GE/GETSCO	GE/GETSCO
			2	784	GE	BWR-4/MARK- I 型	1974/07	GE/東芝	EBASCO	GE/東芝	GE/GETSCO / 東芝/石播	GE	GE/JNF・NFI	GE/東芝 / GETSCO	GE/東芝 / GETSCO
			3	784	東芝	BWR-4/MARK- I 型	1976/03	東芝	東芝	東芝	東芝/石播	東芝	東芝/JNF・NFI	東芝	東芝
			4	784	日立	BWR-4/MARK- I 型	1978/10	日立	日立	日立	日立/パプ日立	日立	日立/JNF・NFI	日立	日立
			5	784	東芝	BWR-4/MARK- I 型	1978/04	東芝	東芝	東芝	東芝/石播	東芝	東芝/JNF・NFI	東芝	東芝
			6	1,100	GE	BWR-5/MARK- II 型	1979/10	GE/東芝	EBASCO	GE/東芝	GE/GETSCO / 東芝/石播	GE	GE/JNF	GE/東芝 / GETSCO	GE/東芝 / GETSCO

[注] 福島第一1号機の設計は1965年、着工は1967年

米国の発電所例：原子力発電所（Pennsylvania州）



米国の発電所例:火力発電所 (East River, NYC, New York州)



➤ **今一番大事なこと**
---汚染水を海に流さないこと！

- **今一番大事なこと**
 - 炉心および使用済み燃料プールの冷却
 - 絶えず水を供給
 - 蒸発しなかった水はどこかに溜まる
 - あふれる水の貯留タンクが絶対必要！

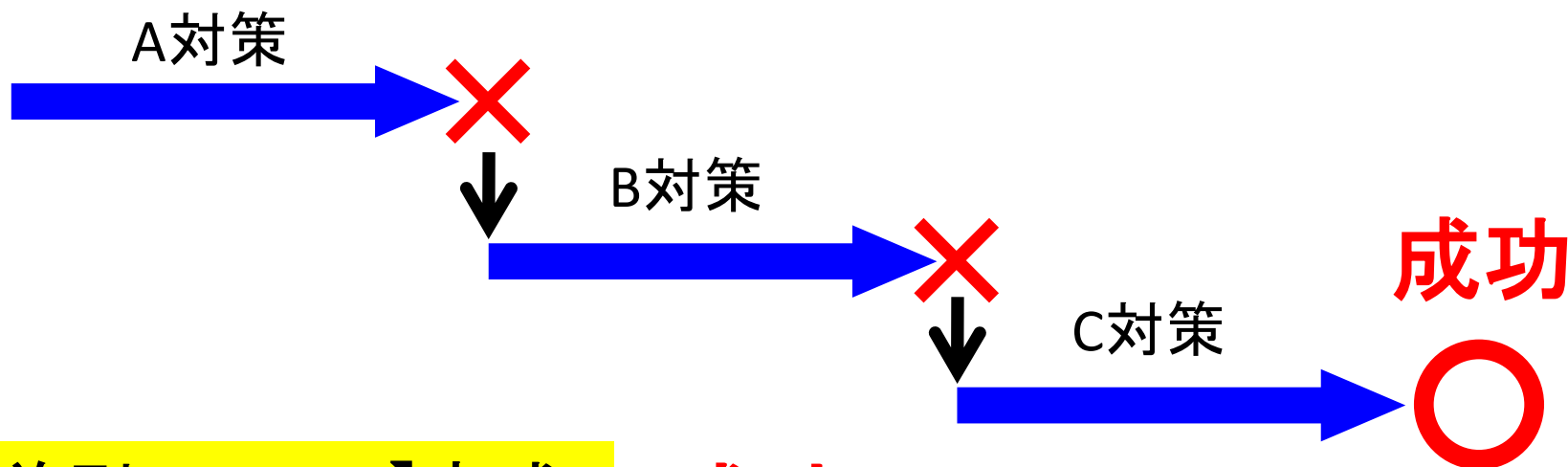
- 前回の7,000tonの汚染水の海水への放流→国際的非難のきっかけ
- 再度の放流は日本の国際的評価を致命的に落とす可能性

➤ **二重・三重の打ち手を！**

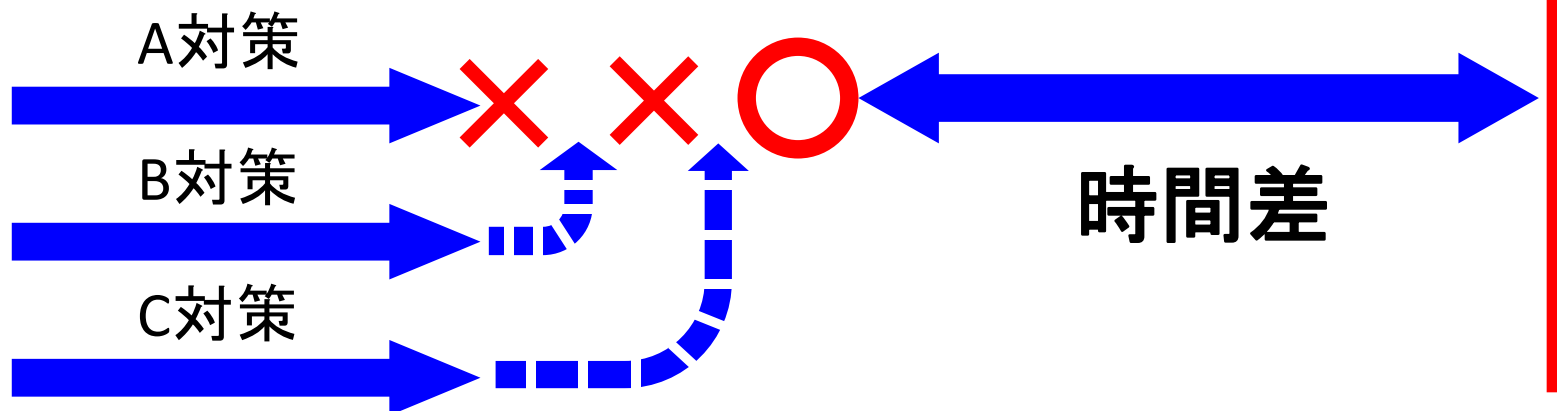
併行して二重・三重の打ち手を！

【直列: Series】方式

(特に時間との競争の場合)



【並列: Parallel】方式



小出しの対策では命取り になる危険性あり



Murphy's Law

(Edward A. Murphy, 1958)

➤ **Anything that can go wrong will go wrong.**

(Merriam-Webster Collegiate Dictionary)

➤ **Nothing is so easy as it looks.**

➤ **Everything takes longer than you think.**

➤ **When things just can't get any worse, they will.**

➤ **Sooner or later, the worst possible set of circumstances is bound to occur.**

Ginsberg's Theorem

- 1. You can't win.
 2. You can't break even.
 3. You can't even quit the game.

Matsch's Law

- ➤ **It's better to have a horrible ending than to have horrors without end.**

解決の見通しはあるのか？

1. “優はいらぬ良でよい”
2. “この際、一気に” という誘惑に負けるな
(不可を取る愚は避けよ)
3. “雨の日もいつかは晴れる”
4. “お天道様は見ている。いつかは必ず味方をしてくれる”

今までうまくいかなかったのは
やはり不十分な所があったのだ！



正しい解決策を実現すれば
必ず良くなる！

汚染水回収用建屋



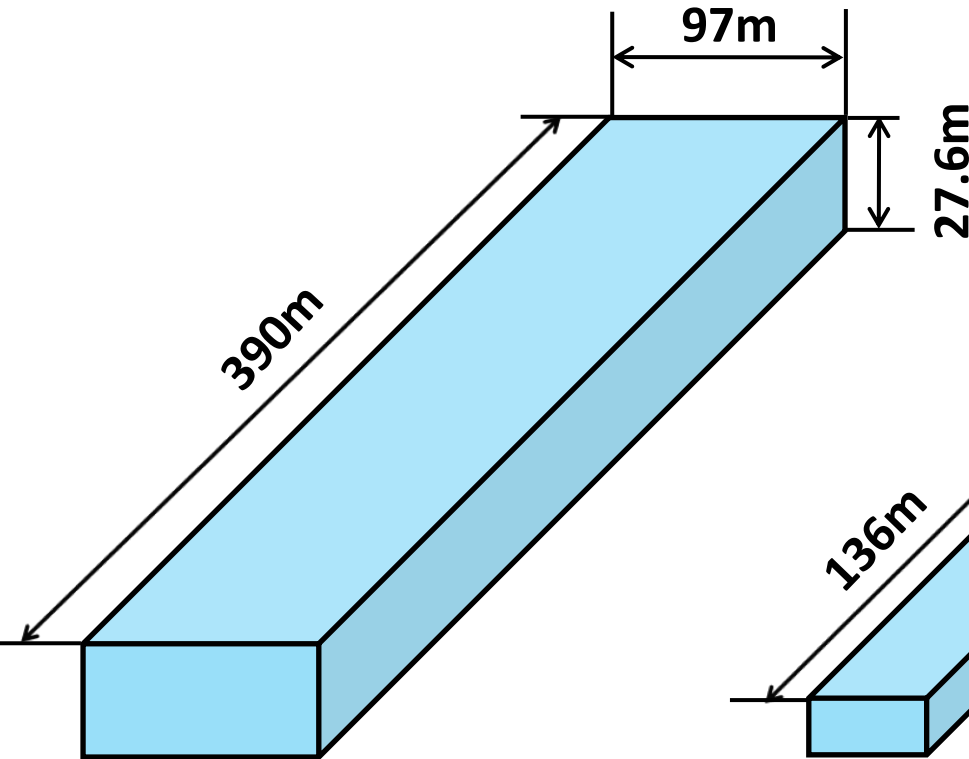
- ▶7月中旬をめどに格納容器を水で満たす予定。
- ▶まず2号機のタービン建屋の高濃度汚染水を送水
- ▶1号機を冷却したいが汚染水が溢れるのが心配

その他の設備： 仮設タンク 1000 ton(設置済)
陸上回収タンク 57,000 ton(完成予定:5月末)?

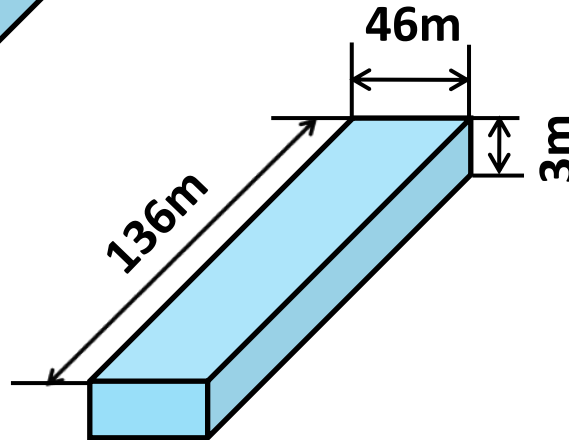
▶陸上にタンクを設けるのがベストだが、二段、三段の準備が要るのではないか？

汚染水回収用タンク候補

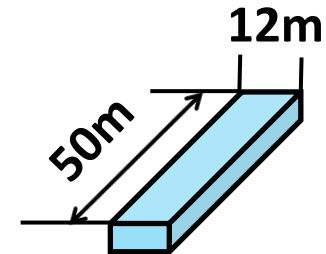
石油備蓄タンク
880,000ton



メガフロート
10,000ton



米軍バージ船
1,100ton



米軍バージ船



メガフロート



上五島石油備蓄基地

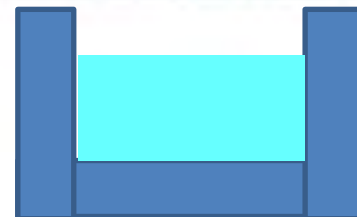


5基の洋上備蓄タンクを常備(1988年完成)



上五島石油備蓄基地

この備蓄タンクは2重殻構造 (Double Hull) となっており、万が一にも貯油原油の流出が無いように配慮されている。



洋上石油備蓄タンク

JOGMEC

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構

		上五島国家石油備蓄基地	白島国家石油備蓄基地	
所在地		長崎県南松浦郡新上五島町	福岡県北九州市若松区白島	
面積		陸域:約26ha 海域:約40ha	陸域:約14ha 海域:約60ha	
備蓄方式		洋上タンク方式	洋上タンク方式	
備蓄容量		約440万kℓ (約88万kℓ × 5隻)	約560万kℓ (約70万kℓ × 8隻)	
貯油量(2009年8月末)		約342万kℓ (78%)	約475万kℓ (85%)	
完成年		1988年	1996年	
設備概要	貯蔵船	容量	88万kℓ × 5隻	70万kℓ × 8隻
		寸法	長さ 390m × 巾 97m × 深さ 27.6m	長さ 397m × 幅 82m × 深さ 25.4m
	排水処理設備	100 m ³ /hr	30 m ³ /hr × 2	
	含油水タンク	9,300 kℓ × 2基	9,700 kℓ × 2基	
	海水ポンプ	1,500 m ³ /hr × 3基		
	消防船兼曳船	1隻		
	油回収船	1隻		

石油備蓄の状況

()内は2009年8月末の貯油量

国家備蓄:5,100 万kℓ	洋上備蓄	1,000万kℓ (817万kℓ)	上五島	440万kℓ(342万kℓ)
			白島	560万kℓ(475万kℓ)
	陸上備蓄	4,100万kℓ		
民間備蓄:3,700万kℓ				
合計 8,800万kℓ (約194日分)				

[注] 2009年8月末のデータ(JOGMECのホームページ公開の最新データ)では貯油率は $342/440=0.78$ となっており、80%以下である。これは5基のタンクの貯油量を4基で収容出来ることを意味し、1基を空にすることが出来る。

上五島洋上備蓄タンク(88万KI)を一日も早く現地に!



洋上備蓄タンク1基
の想定大きさ



二重船底 (Double Hull) 石油タンカー

3. 今後のエネルギーの動向

火力発電と再生エネルギー

原子力の喪失分をどうするか？

1. 火力と再生エネルギーで出力をカバーできるか？
2. 火力の場合、燃料は確保できるか？ CO₂は大丈夫か？

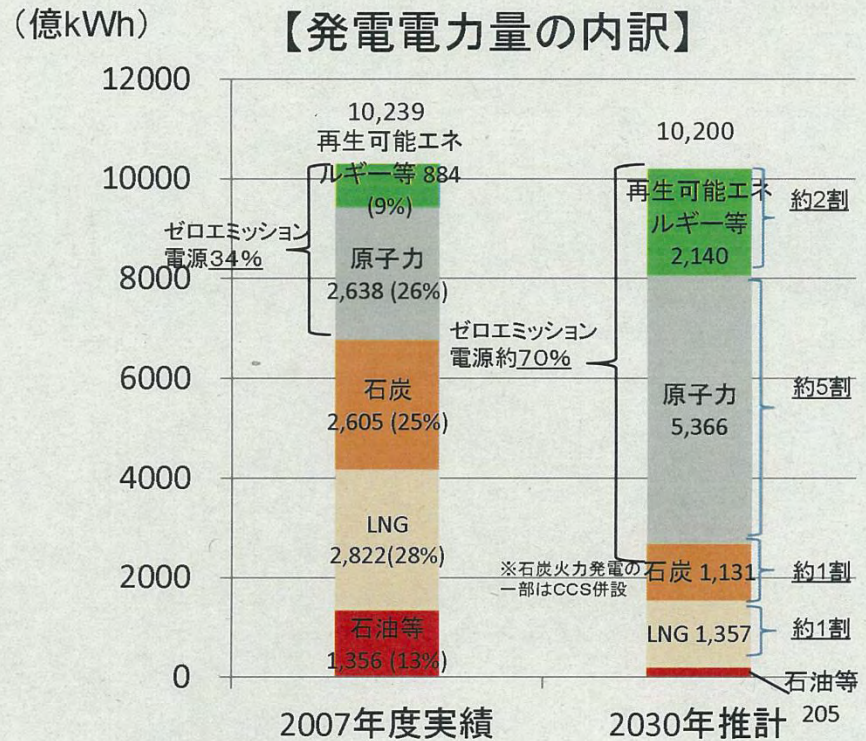
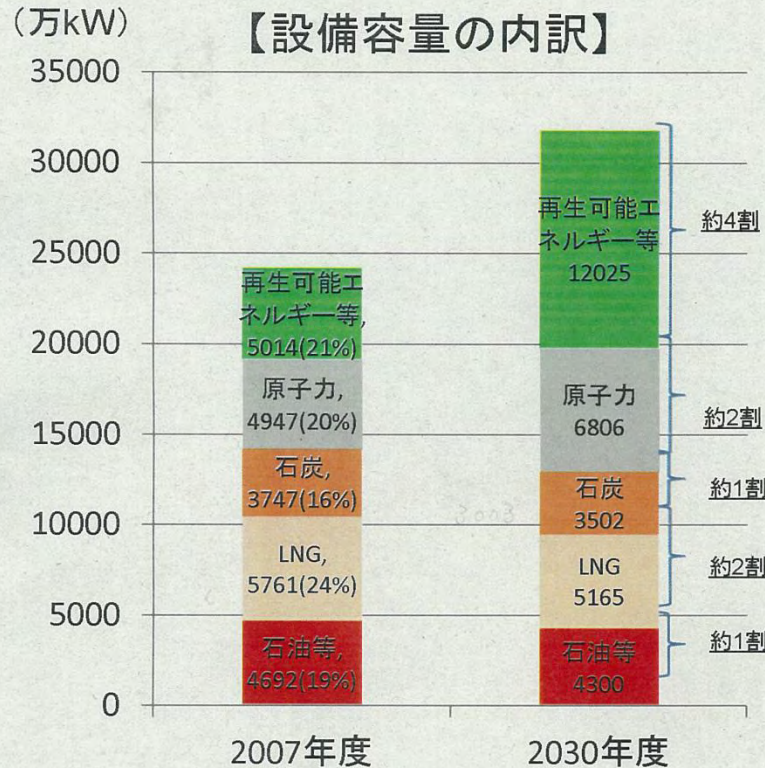
1. 火力発電は燃料の如何を問わず徹底的に高効率化すること！
2. セキュリティ上天然ガス・石炭いずれにも対応できる技術であること

供給側の絵姿②（電源構成）

○電源構成の内訳は以下の通り。

○ゼロ・エミッション電源比率は約70%程度となる※。（現状34%）

※2030年の「再生可能エネルギー等」には、家庭等での発電量も含む



※大幅な省エネルギーや、立地地域を始めとした国民の理解及び信頼を得つつ、安全の確保を大前提とした原子力の新增設（少なくとも14基以上）及び設備利用率の引き上げ（約90%）、並びに再生可能エネルギーの最大限の導入が前提であり、電力システムの安定度については別途の検討が必要である。

※石炭火力については、商用化を受けて、リプレース時には全てCCSを併設すると想定。今後の技術開発やCO2の貯留地点の確保等によって変動しうる点に留意が必要。

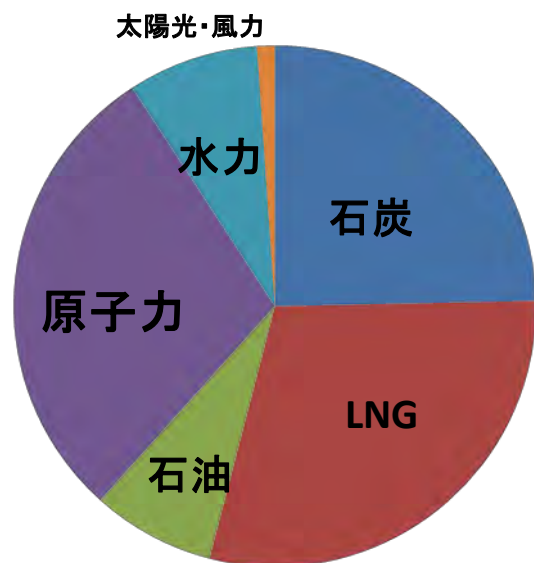
※ゼロエミッション電源約70%には、再生可能エネルギー等のうち、廃棄物発電及び揚水発電を除く。

1. 火力発電の効率向上の必要性

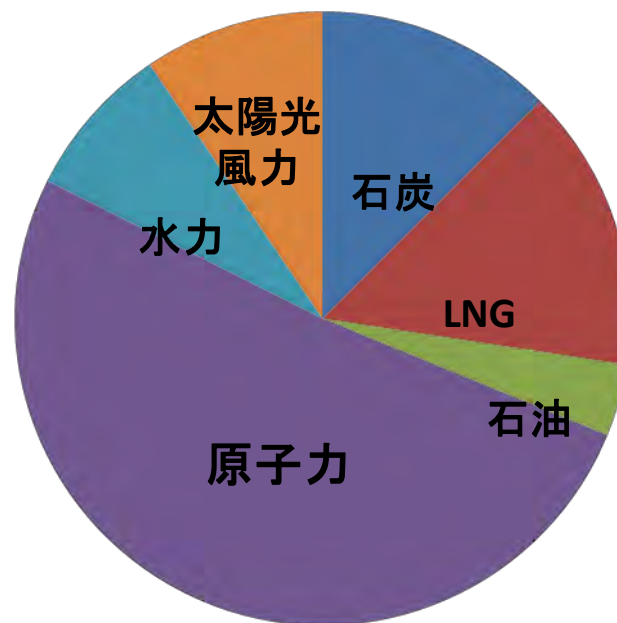
現状

2010年6月閣議決定したエネルギー基本計画
より算定

発電電力量の構成(2009)



発電電力量の構成(2030)



➤2010年の計画では、原子力の比率を50%とし、火力の発生電力量を6,170億KWhから3,100億KWhに半減し、CO2発生量を半分にする計画であった。今回、原子力の比率を下げることになることになると、この減少分を火力と再生エネルギーでカバーしなければならない。

思い切った太陽光・風力の増設でも全電力の10%未満！

等価設備容量

● 5000万kWの太陽光発電
(2005年の20倍)



$5000 \times 0.12 = 600$ 万kW
【6%】



全一戸建の5割に搭載

● 1000万kWの風力発電
(2005年の5倍)



$1000 \times 0.22 = 220$ 万kW
【2.2%】

合計 8.2%

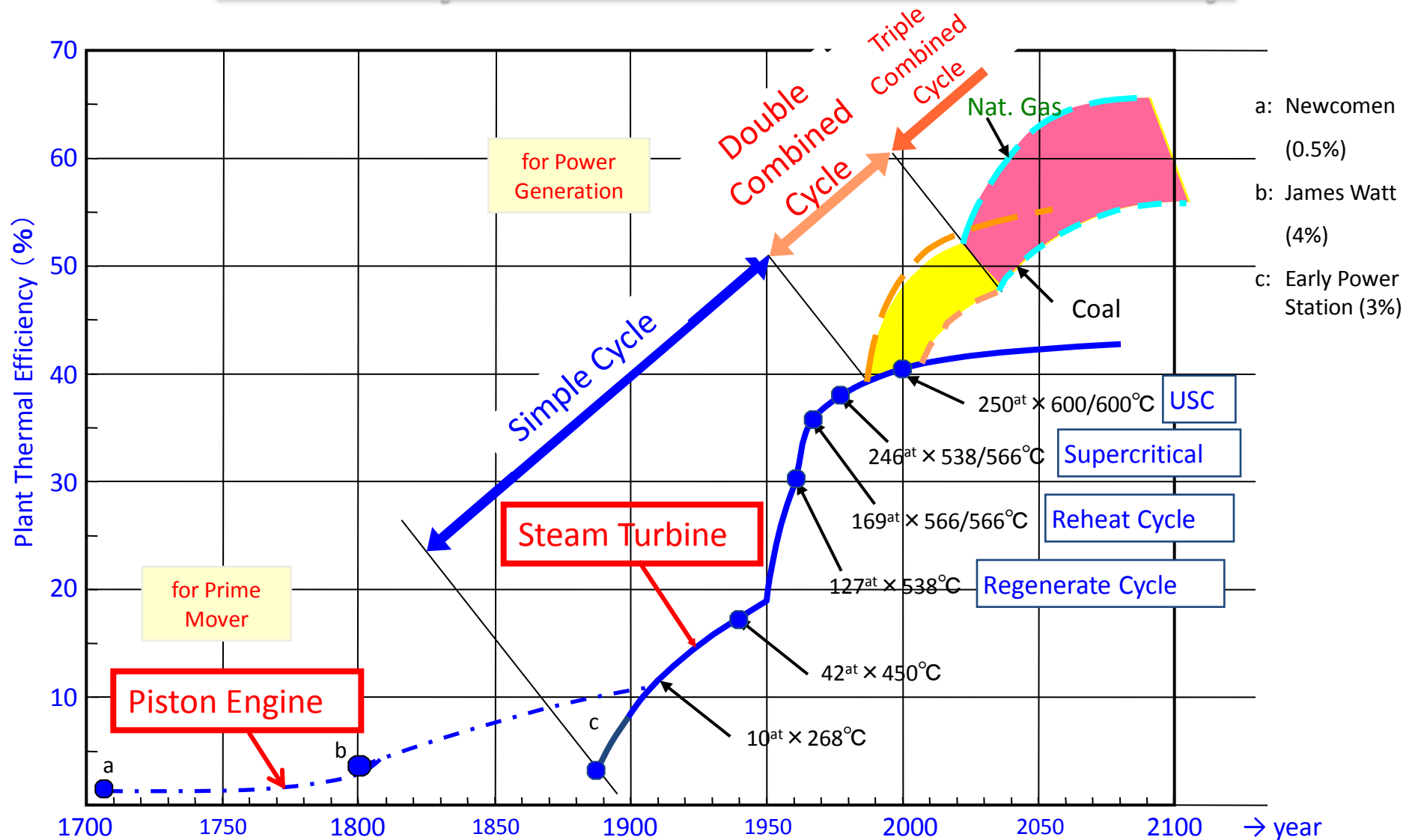


**Amish People
(Lancaster County, Pennsylvania, USA)**

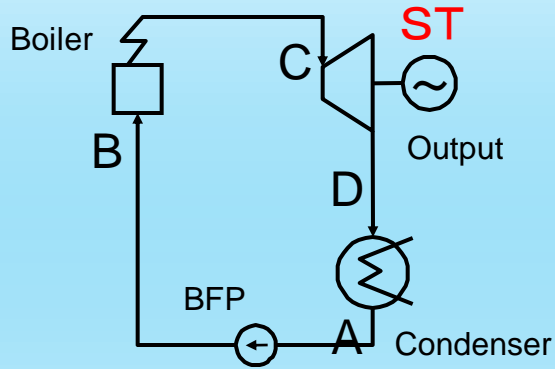
3. 今後の動向と解決策

1. 容量的に太陽光発電・風力発電は原子力の代替は出来ない
2. 従って火力発電の徹底的な高効率化しか選択肢は無い
3. 天然ガス焚き複合発電が最も有利→しかしあまりに天然ガスに偏重するとエネルギーセキュリティ上問題---石炭も重要
4. 高効率火力発電の現状: 蒸気タービンの高温・高圧化→耐高温材料が鍵: 超超臨界圧石炭火力(USC)
5. USC石炭火力の現状: 1990年代日本の独壇場→現在は中国が生産・建設の中心→日本の優位性の喪失
6. 今後は石炭も複合発電の時代へ→石炭ガス化複合発電(IGCC)
7. 更に将来は高温型燃料電池を加えたトリプル複合発電の時代へ

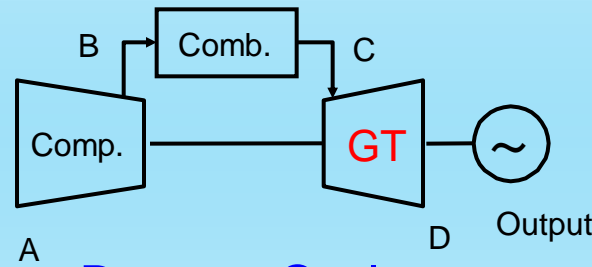
History of Thermal Efficiency



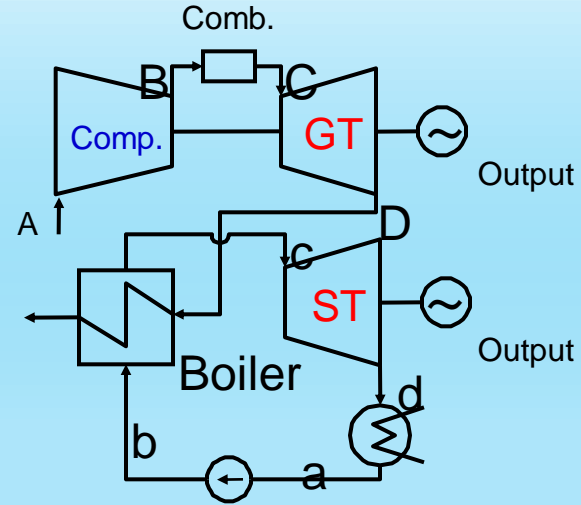
発電プラントのサイクル



Rankine Cycle



Brayton Cycle



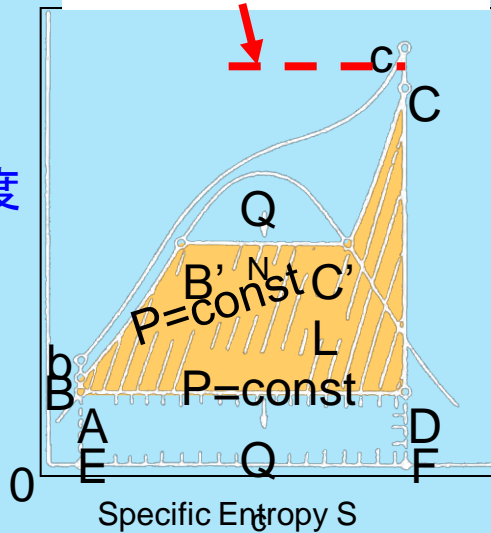
● Combined Cycle

蒸気温度 $\approx 600^{\circ}\text{C}$

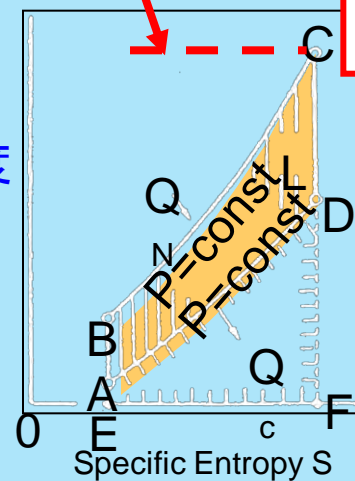
入口ガス温度 $\approx 1500^{\circ}\text{C}$

1粒で2度おいしい!

温度
T



温度
T



温度
T



出典：金子祥三，“化学工業”（1992年8月号），p.32-39

パーソンズの蒸気タービン

- 1884年の特許：軸流多段蒸気タービン
- 1896年の特許：棒鋼より翼を大量生産し、ロータに掘った溝に植込む

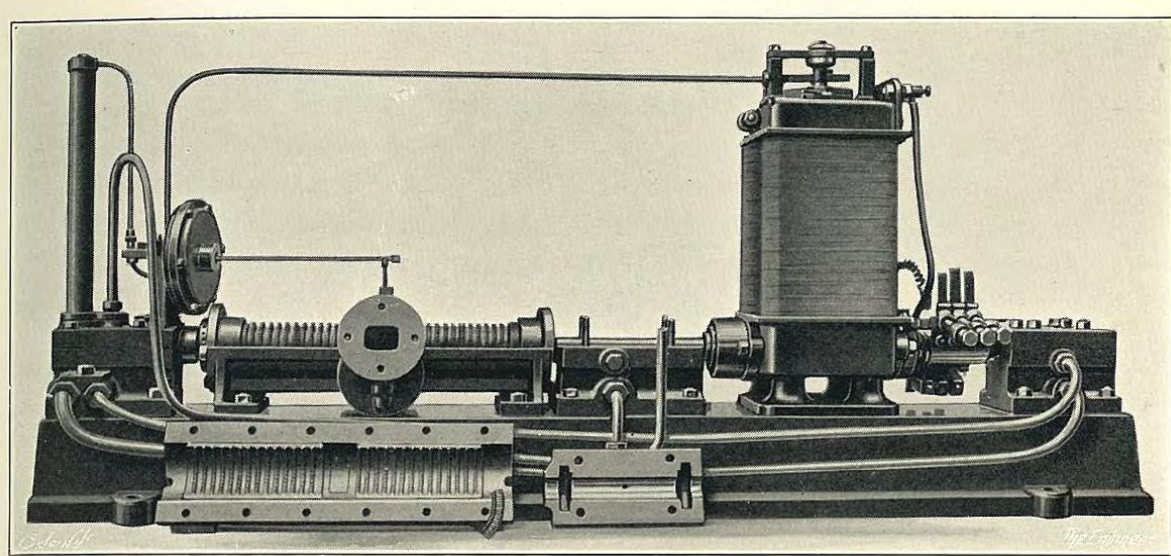


FIG. 1—THE FIRST PARSONS STEAM TURBINE

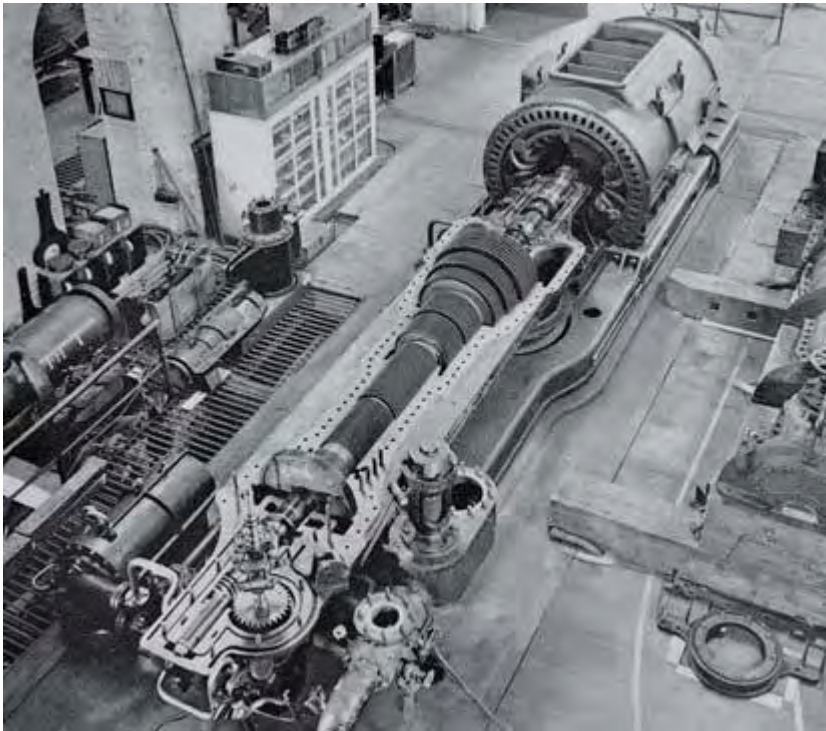
パーソンズ蒸気タービン第1号機



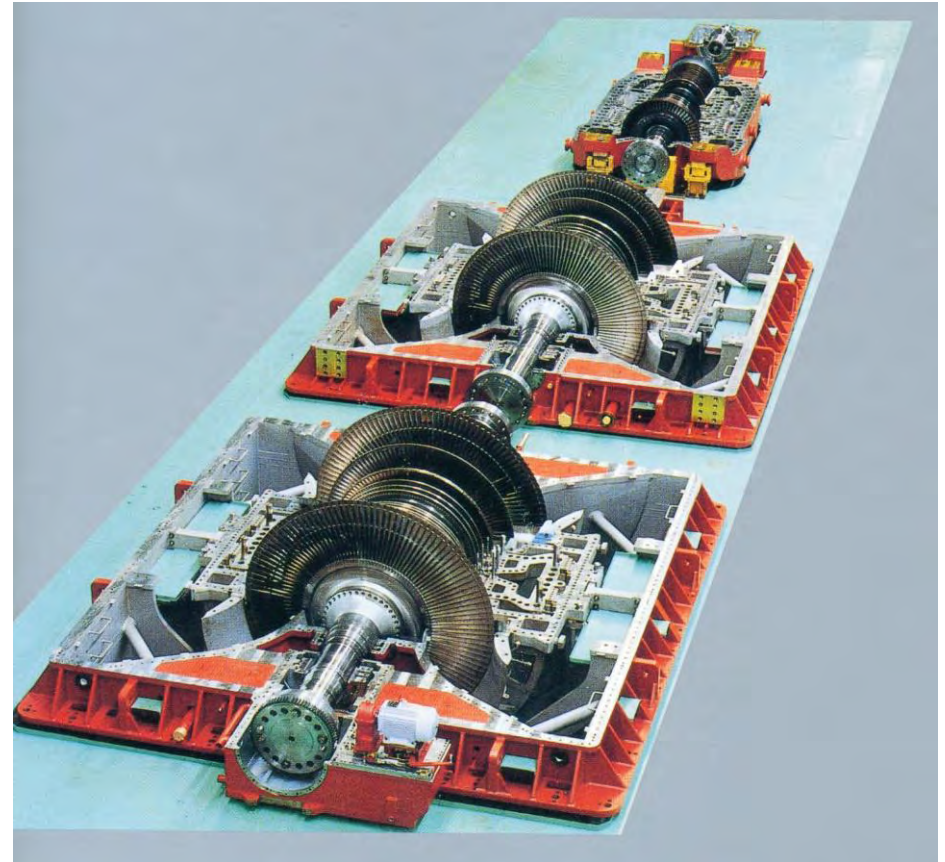
Charles A. Parsons

Cited from : H.W. Dickinson, " A Short History of Steam Engine "

日本の蒸気タービン

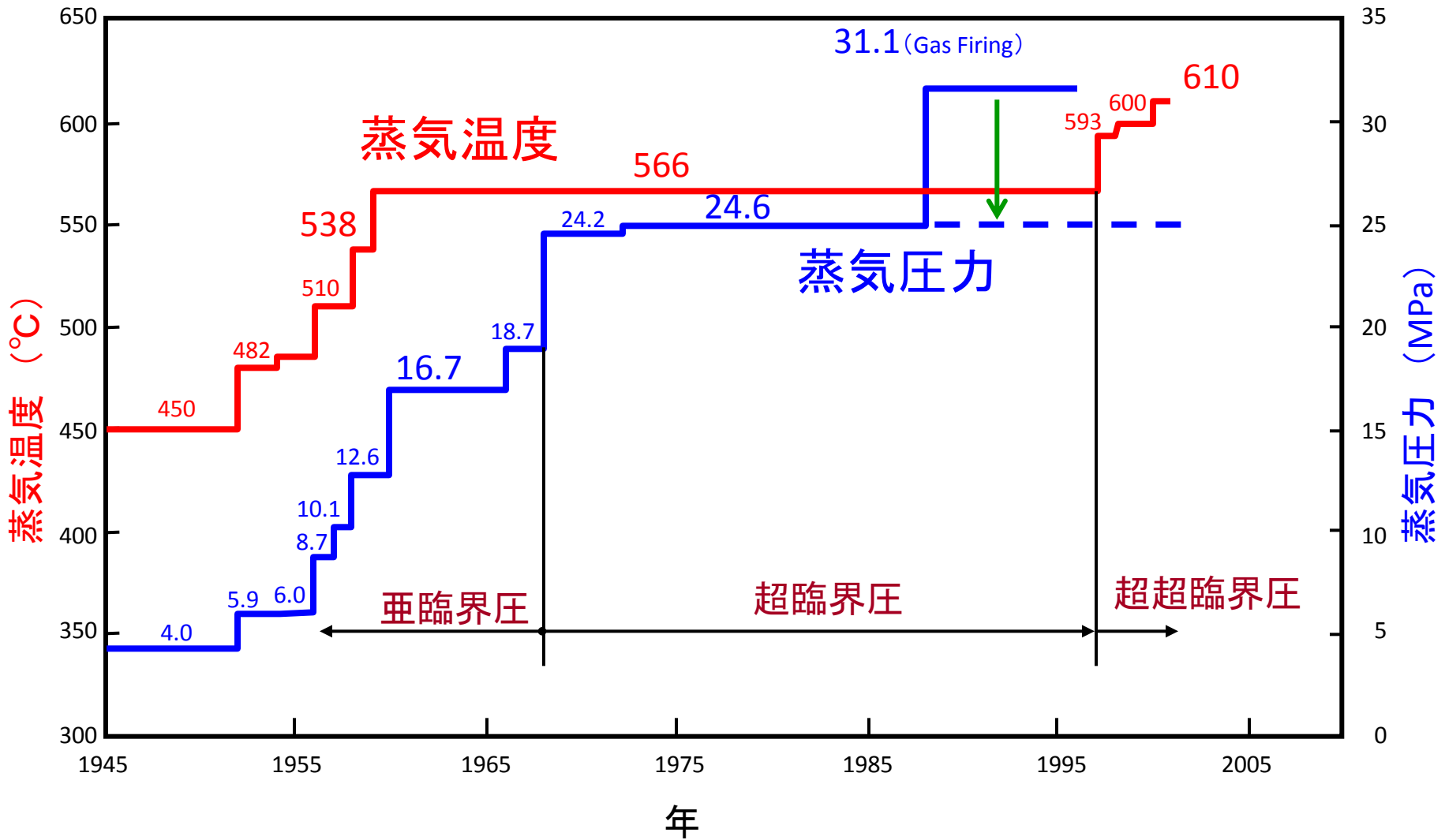


最初の発電用蒸気タービン: 500KW
(1905年)



最近の発電用蒸気タービン: 700,000KW
(1995年)

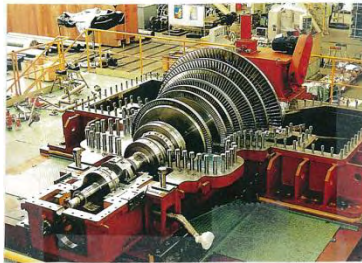
火力プラントの蒸気条件



ジェットエンジンの進歩とガスタービンの進歩

単純サイクル

[ボイラ+蒸気タービン+発電機]



・蒸気タービン



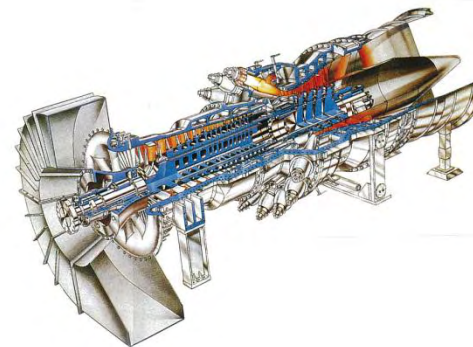
・航空用ジェットエンジン

複合サイクル

[ガスタービン+排ガスボイラ
+蒸気タービン+発電機]



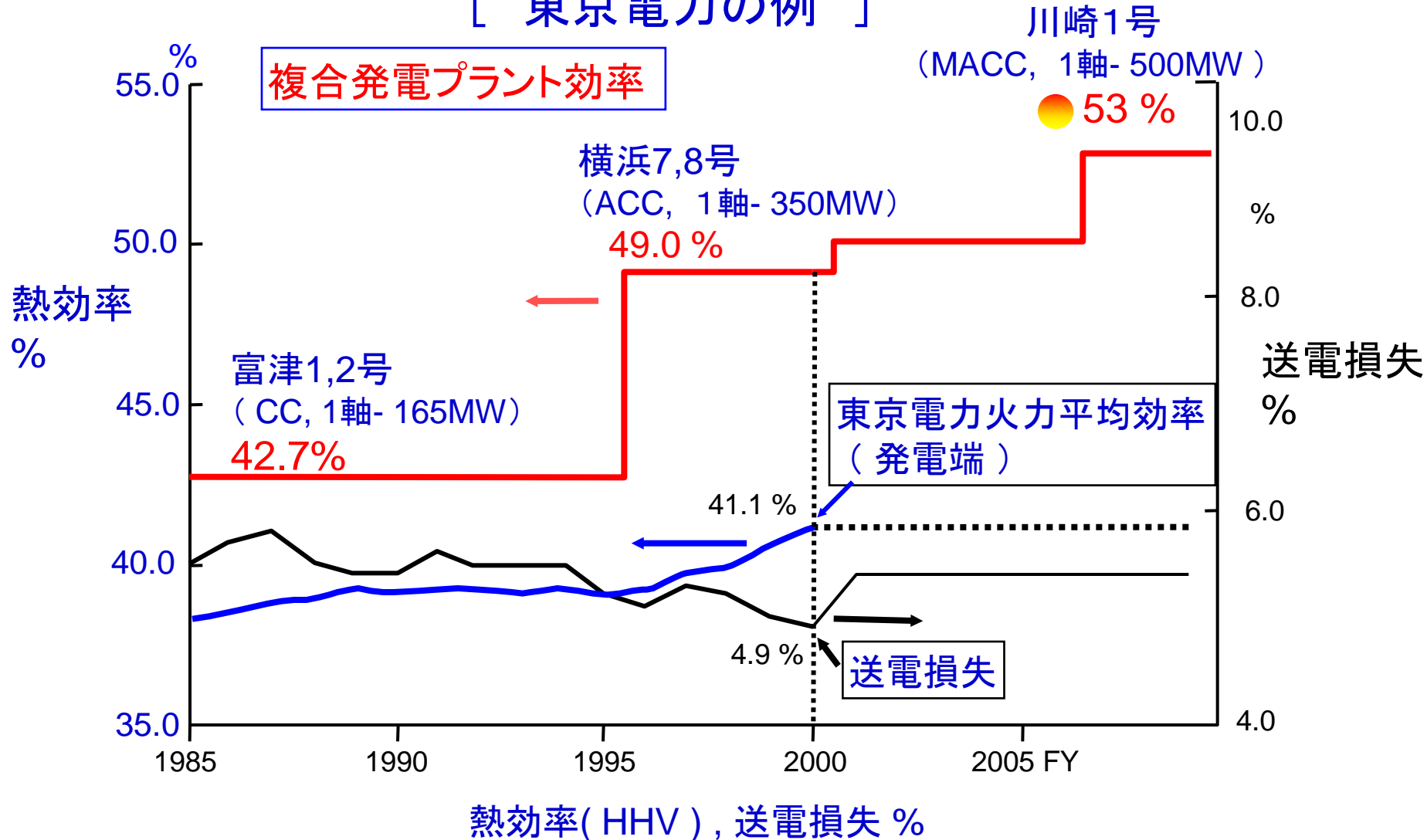
複合発電



・発電用ガスタービン

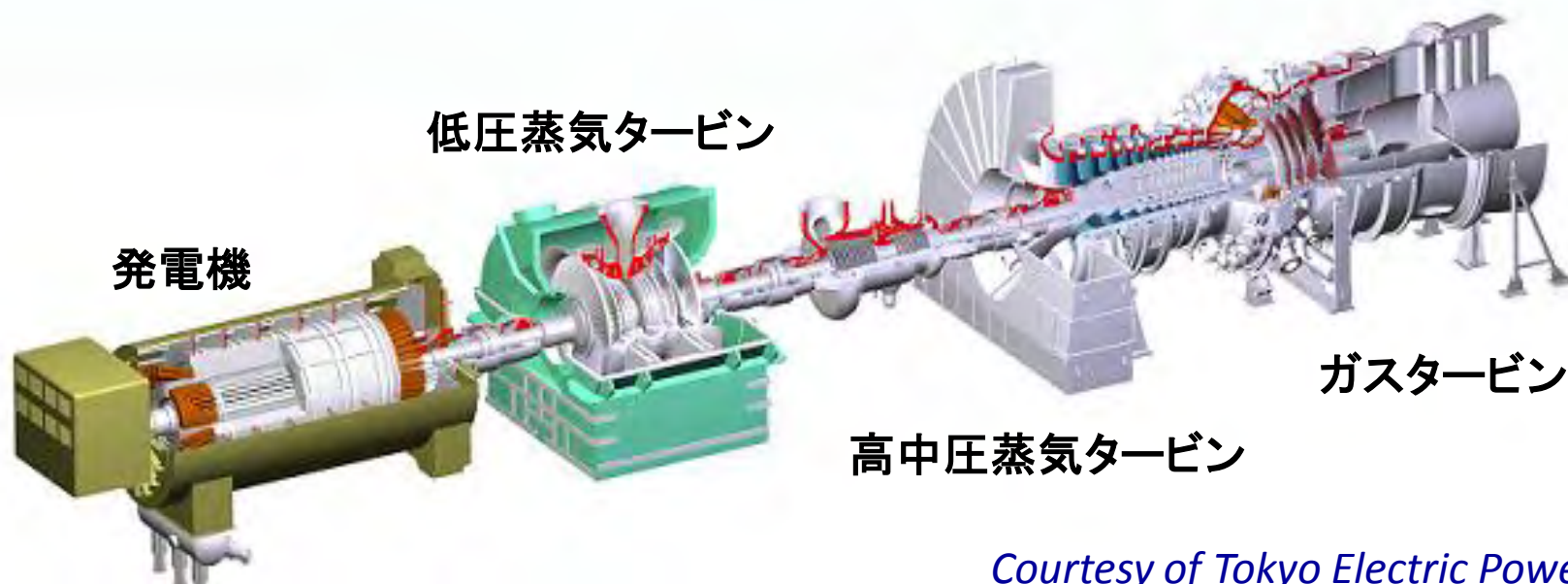
ダブル複合発電 (LNG)

[東京電力の例]



出典 : 東京電力環境行動計画報告 2001年, p.30

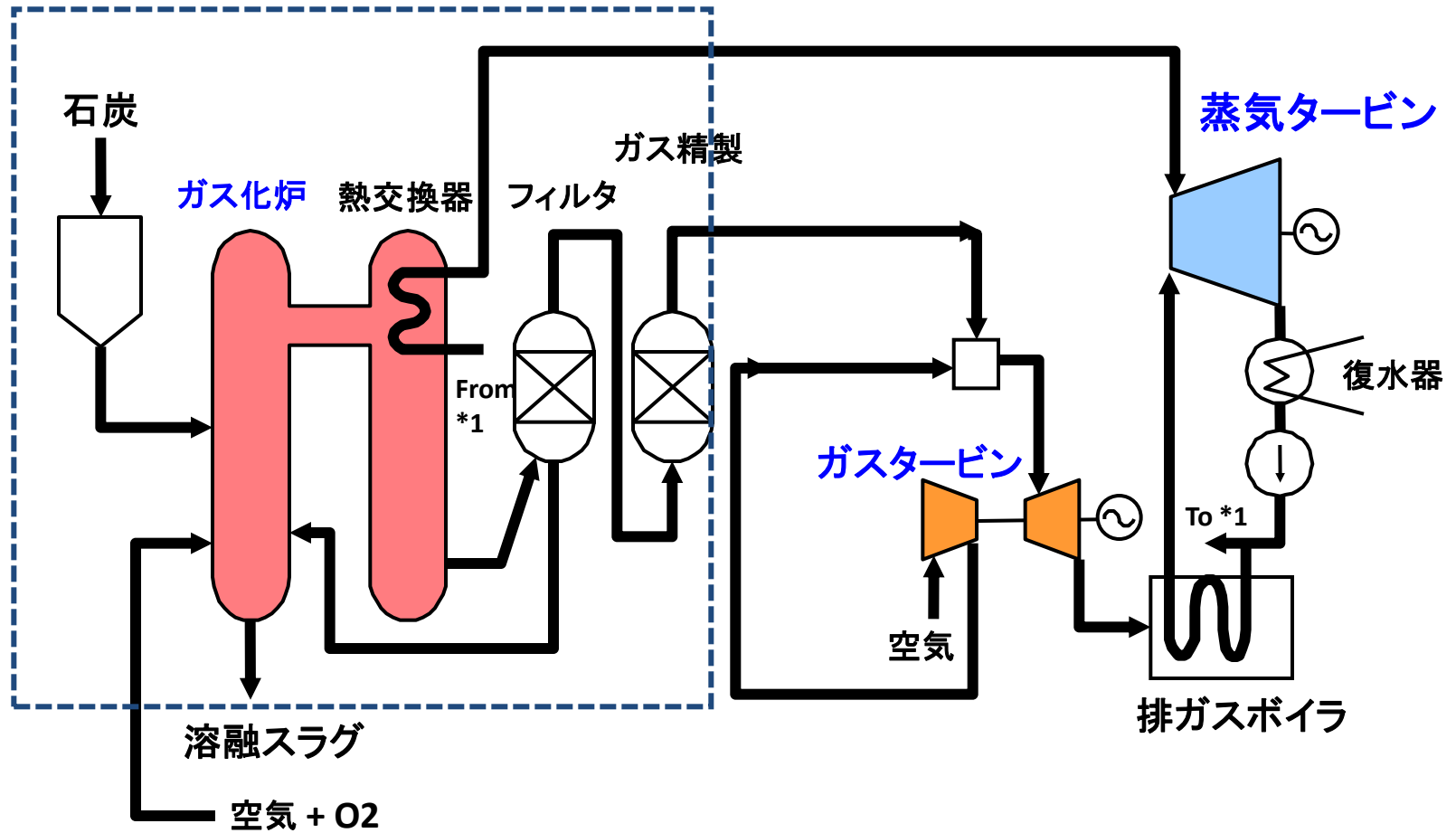
1,500°C級コンバインドサイクル発電設備主要機器



Courtesy of Tokyo Electric Power Co.

石炭ガス化複合発電 (IGCC)

ガス化炉およびガス精製



4. 火力発電の今後

ダブル複合発電からトリプル発電へ！

トリプル複合発電システム

(究極の高効率発電)

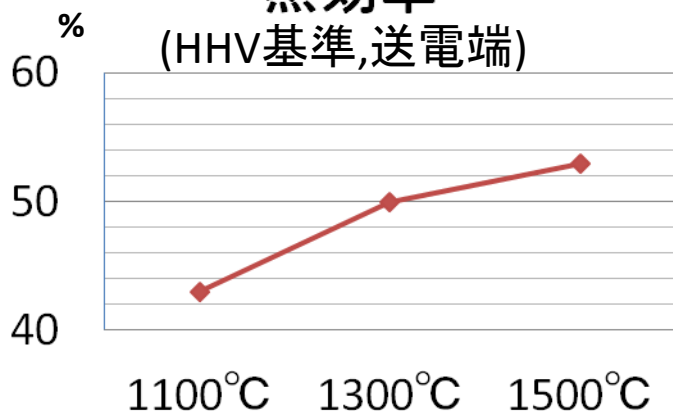
ダブル複合発電システム

ガスタービンと蒸気タービンの組合せ



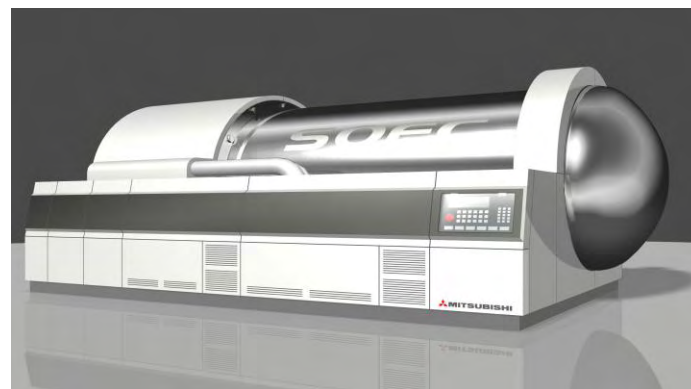
熱効率

(HHV基準,送電端)



トリプル複合発電システム

固体電解質形燃料電池とガスタービンと蒸気タービンの組み合わせ

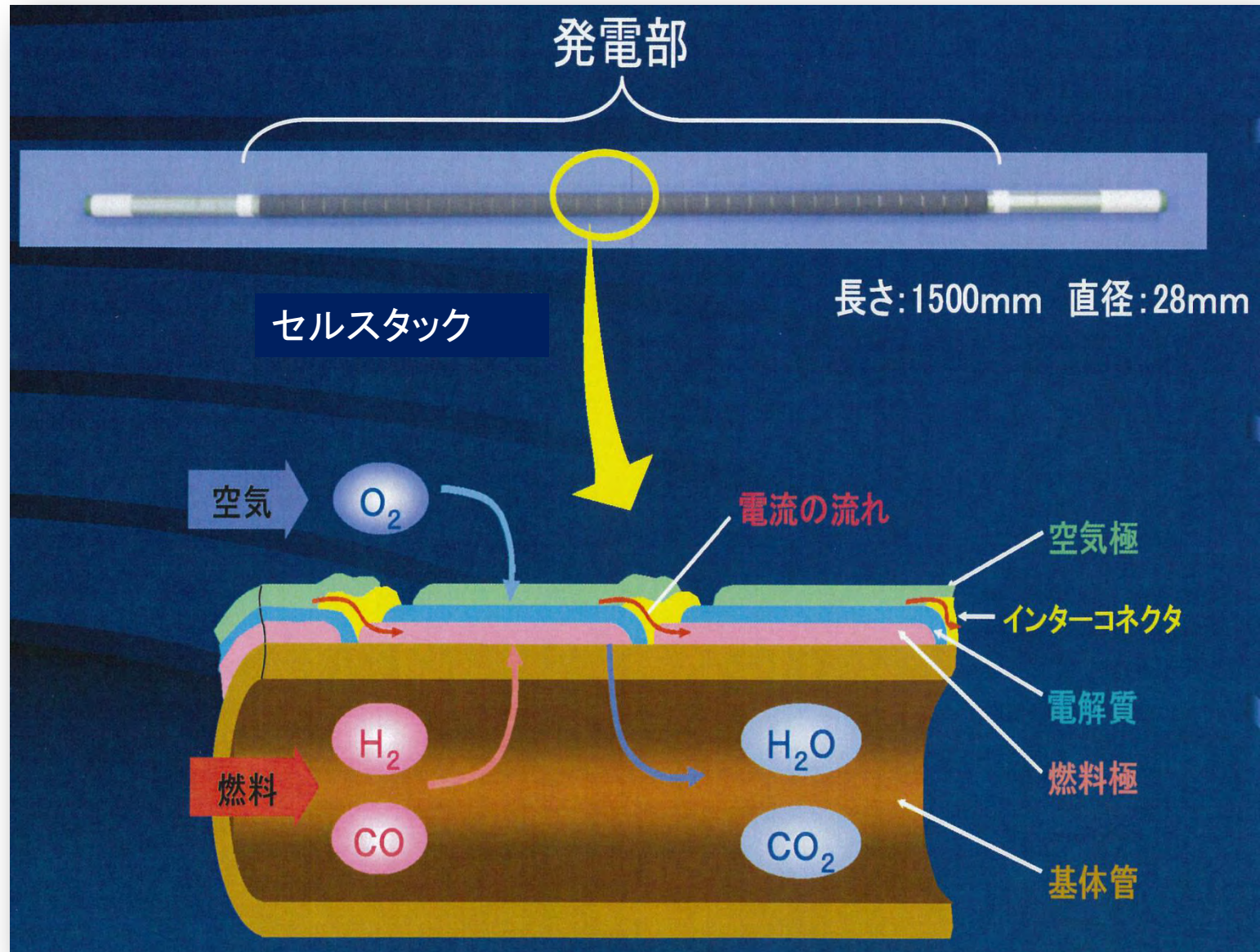


三菱重工技報VOL. 44, NO. 1,2007より

LNG燃料 : 65%
石炭燃料 : 55%
(HHV基準,送電端)

全LNG・石炭火力に適用すると216百万
トンのCO2が削減される。

円筒形SOFCの構造



何故トリプル複合発電は効率が高いのか？

(エクセルギー再生の典型例)

固体酸化物燃料電池
(SOFC)

水蒸気改質反応
(Steam Reforming)

SOFCによる発電

吸熱反応
 $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$
(endothermic)

SOFC効率50%

50%の廃熱

Q

熱エネルギーが化学エネルギーに変換
(2割上昇)

燃料極の電極

Ni

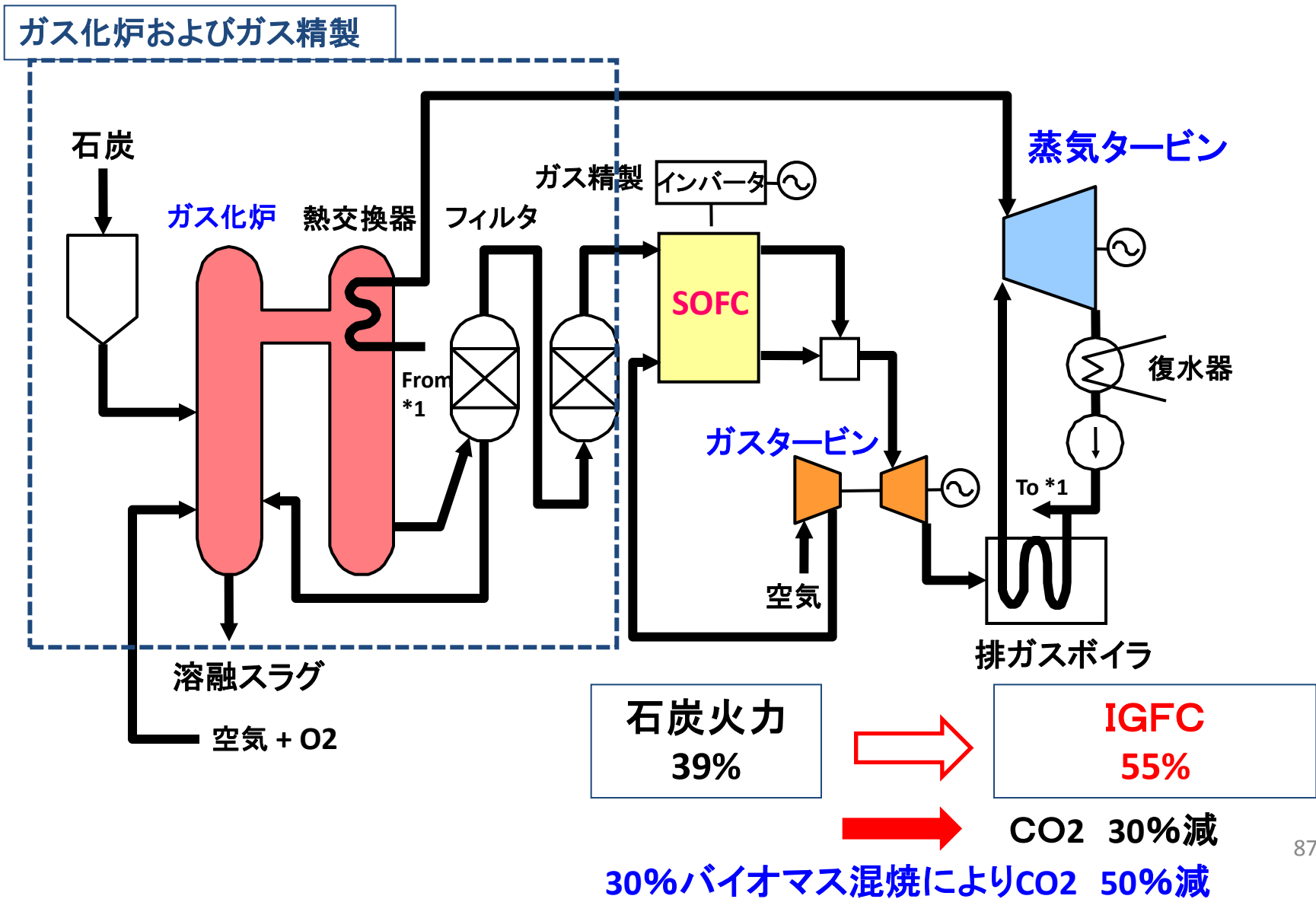
Ni触媒

900~1000°C

作動温度

900~1000°C

4-1-4. 石炭ガス化トリプル複合発電 (IGFC) (石炭ガス化とSOFCの組合せ)



5. 再生エネルギー

地域復興と如何に関連させるか

- 地熱発電
- バイオマス発電
- 波力発電

再生エネルギーを如何に伸ばすか？

1. 太陽光
2. 風力発電 ●
3. 波力発電 ●
4. 地熱発電 ●
5. バイオマス発電 ●

地域共生型の発電が出来るかどうかが鍵！

革新的な技術を採用しているか？

東北地方は自然エネルギーの宝庫

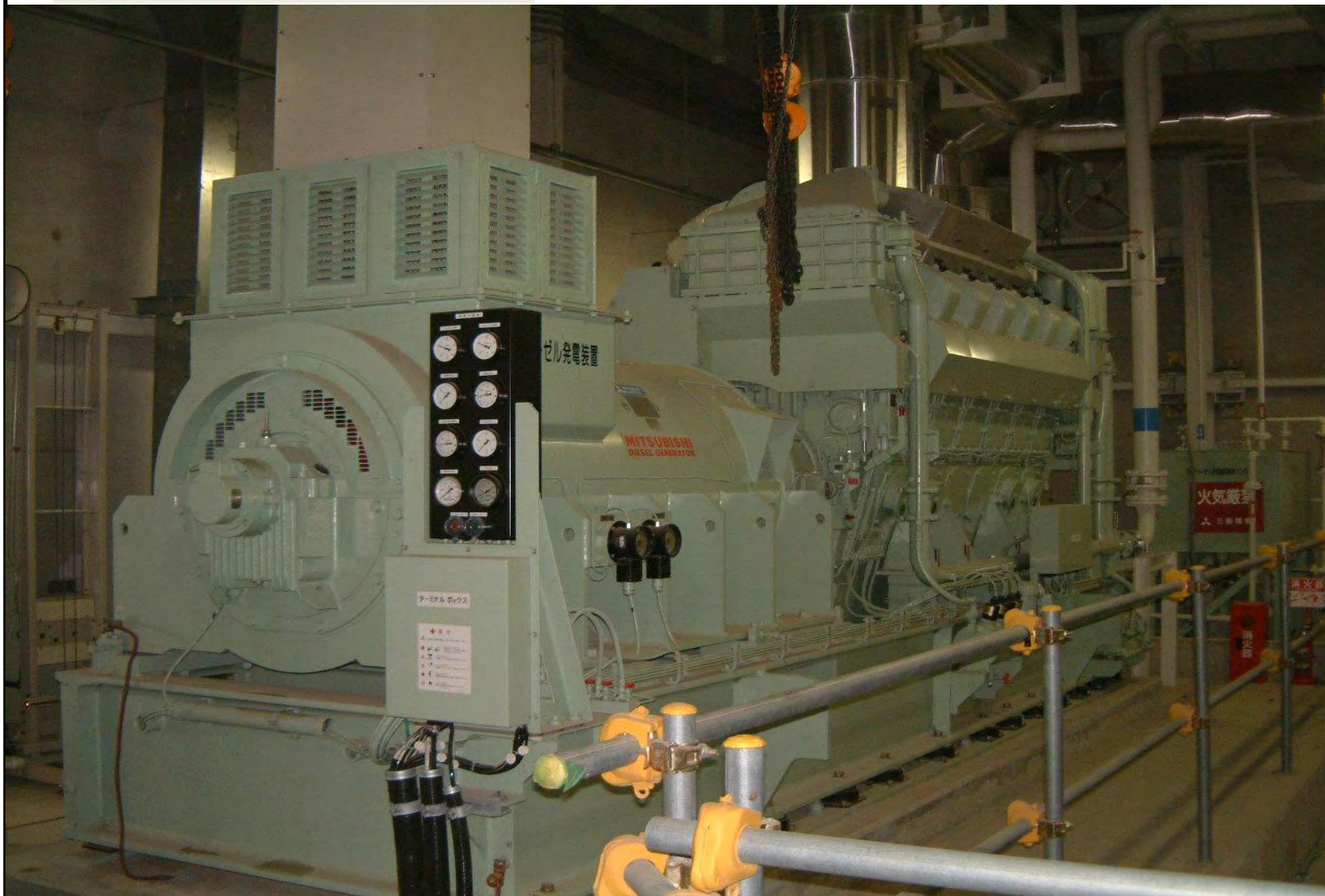


6. 安全・安心のために

- 安全・安心はタダでは無い！
- それなりの対価を払わねばならない！

- もう一度原点に戻って見直そう！
- 思い切った改善をするには今がチャンス！

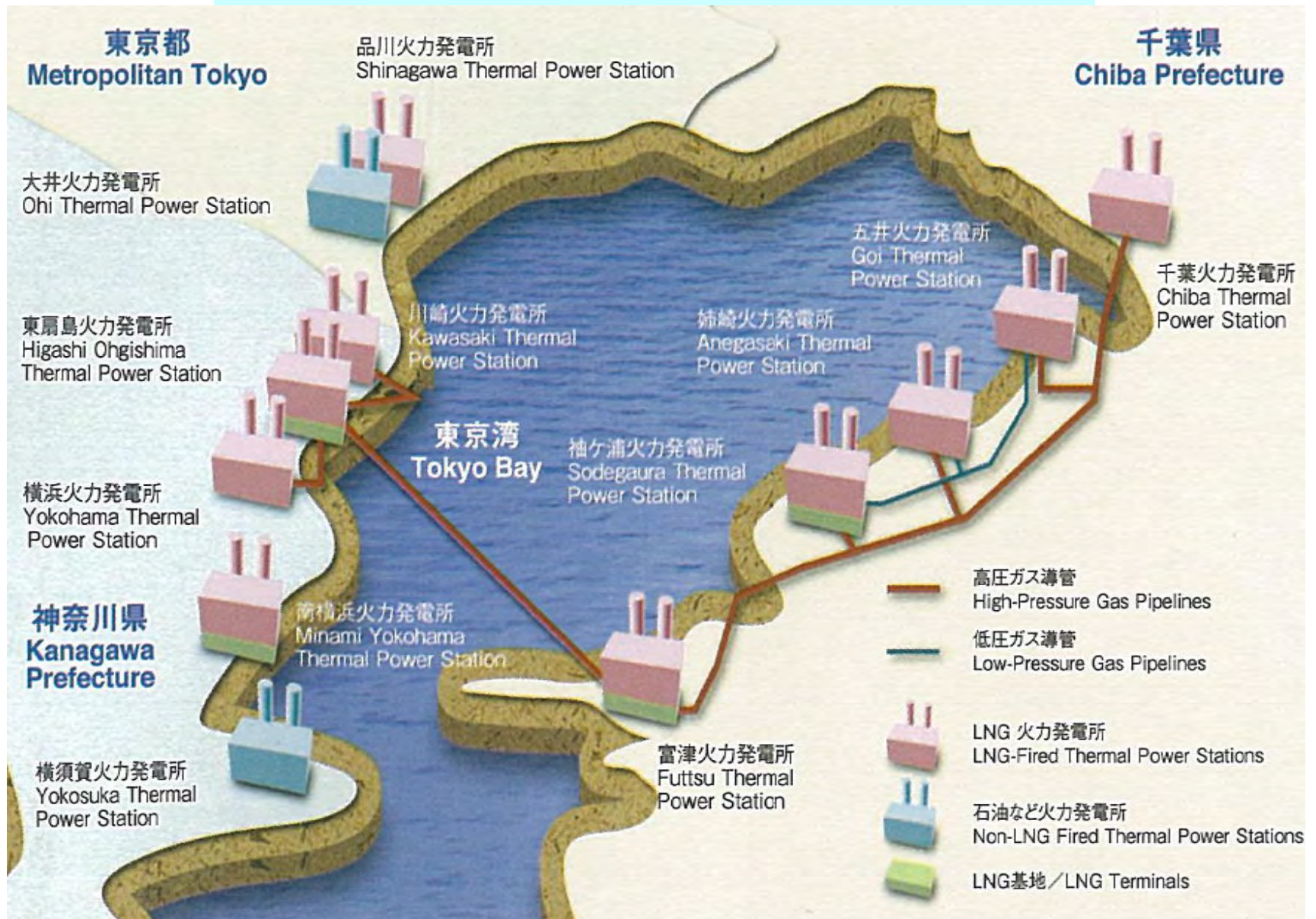
非常用発電設備



非常用電源 (蓄電池)



東京湾内のLNG焚き発電所



LNG火力への過度の依存はセキュリティ上問題



LNG火力はサラブレッド → クリーンで高効率で建設費安く短納期
→しかしLNGが来なくなったら、たちまち使用不能に！



アリとキリギリス

キリギリス
- 天然ガス?

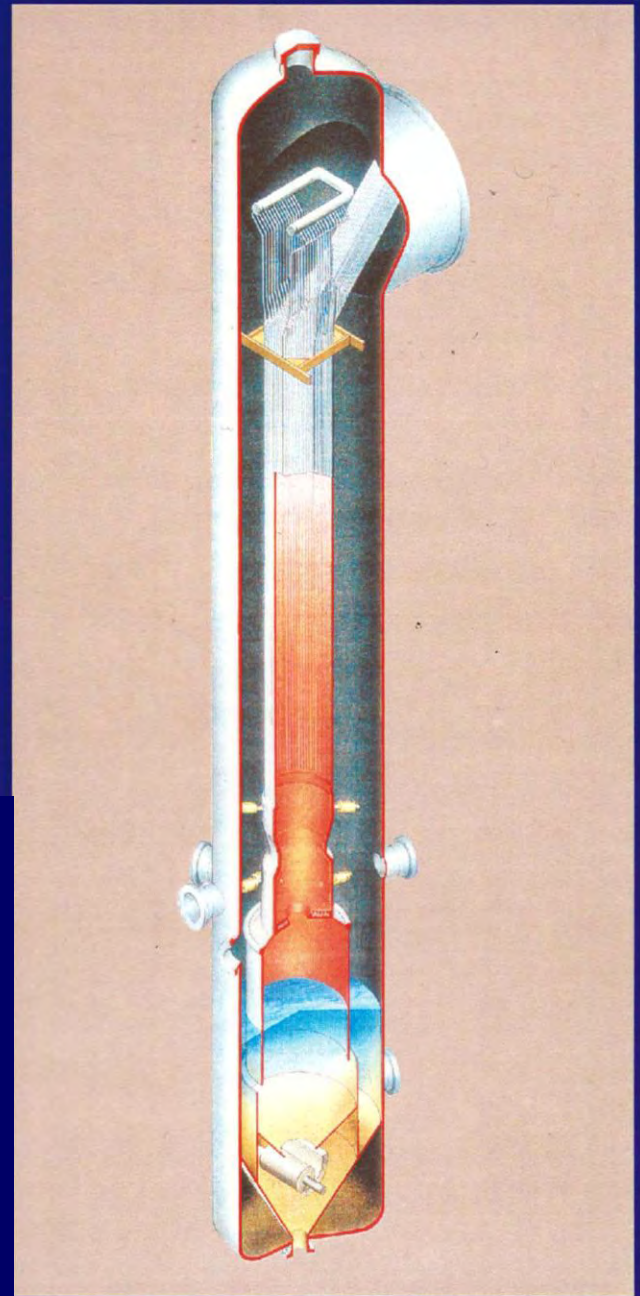


アリ
- 石炭?

石炭ガス化の効用 →天然ガスとの互換性

- Pressurized
- Air Blown
- Two Stage
- Entrained Flow

液体燃料の製造も可能





Santa Barbara

英国は偉い！安全に関する徹底した考え方



徹底した発電所の防衛訓練！



William王子結婚式のパレード
近衛兵の銃に注意！
(L85A1 Assault Rifle)

cf. Patriot Games by Tom Clancy



エジンバラ城の衛兵



(L85A1 Assault Rifle)

豪華客船も戦時には徴用！



フルターンキープロジェクトのリスク



自民党政府

2009年6月10日



“Mamizu” Policy(真水対策) (“Genuine Clear Water” Policy)

2020年温室効果ガス削減 **15%**
(2005年基準)

(1990年基準**8%**)

民主党

マニフェスト: 2009年8月
温暖化対策基本法: 2010年3月

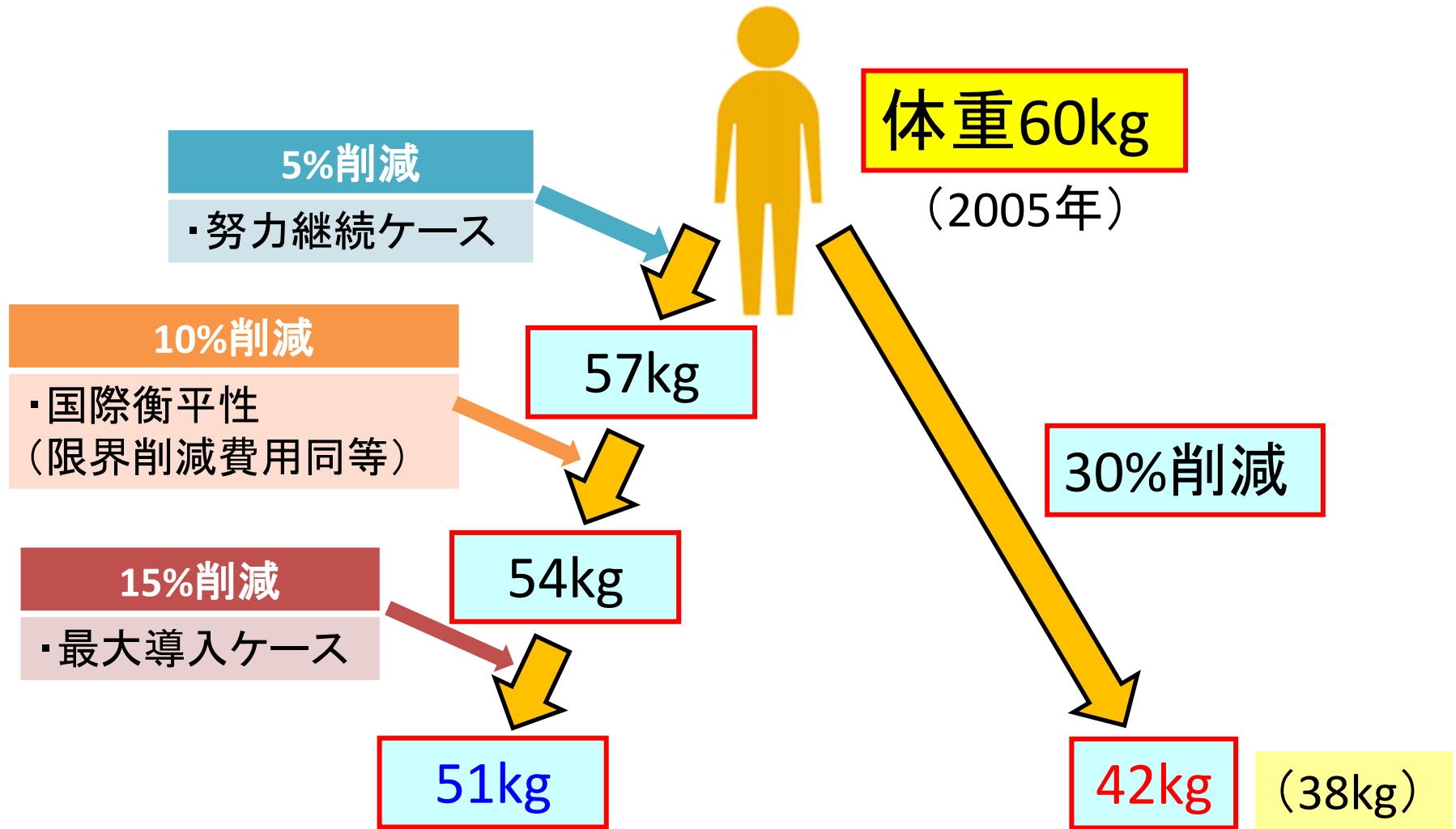


Challenging Environmental Policy

2020年温室効果ガス削減 **25%**
(1990年基準)

(2005年基準**30%**)

CO₂削減で衰弱死するのは馬鹿げている！



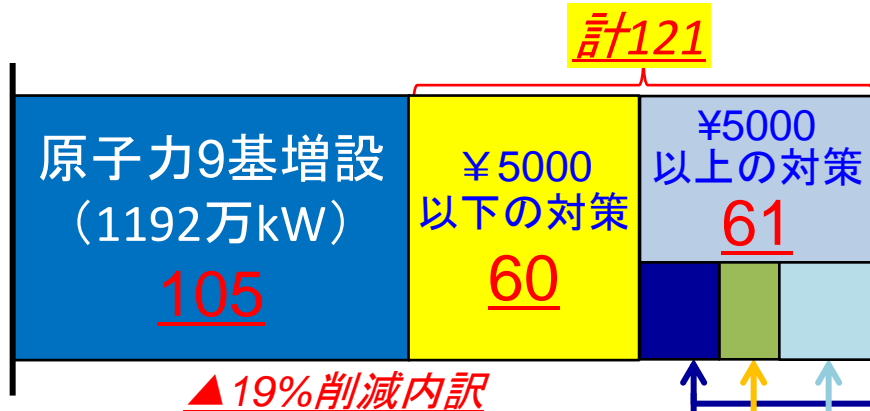
最大の懸念：ダイエットし過ぎで衰弱死しないか？

CO2削減案内訳

※【単位:百万t-CO₂】

自民党中期目標値:旧政府案(2009/6/10)

2005年比GHG15%削減 → CO₂は19%削減



このままでは207百万トン
足りない！
→必死になって知恵を
出さねばならない！

計226

次世代自動車:21

太陽光20倍:16

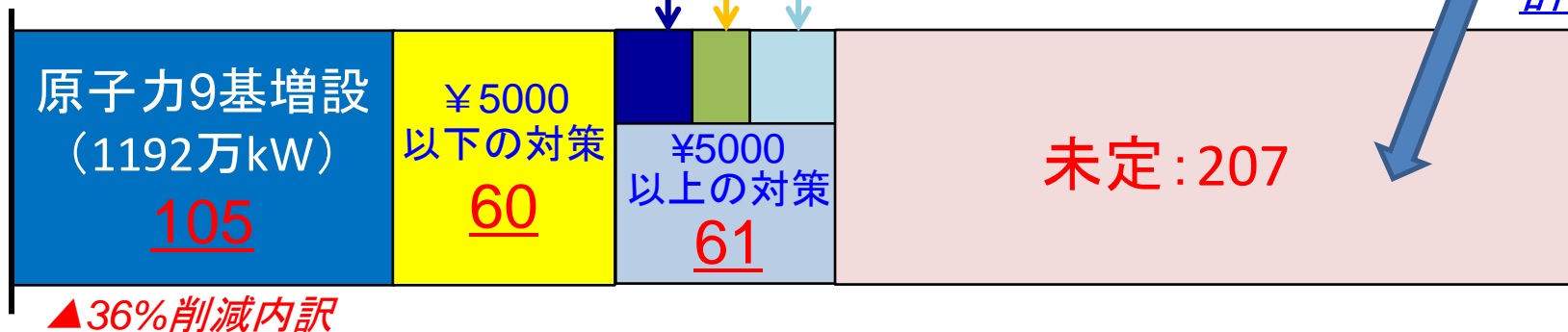
省エネ住宅・BEMS・給湯等:23

民主党中期目標値

1990年比GHG25%削減

→2005年比で30%削減

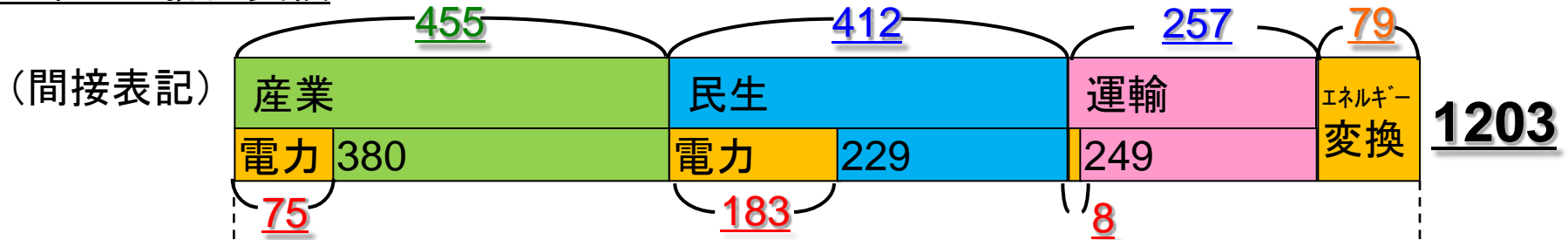
→CO₂は2005年比で36%削減



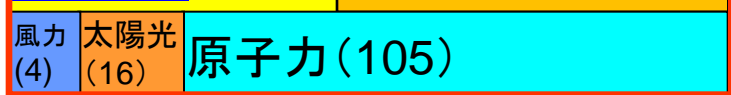
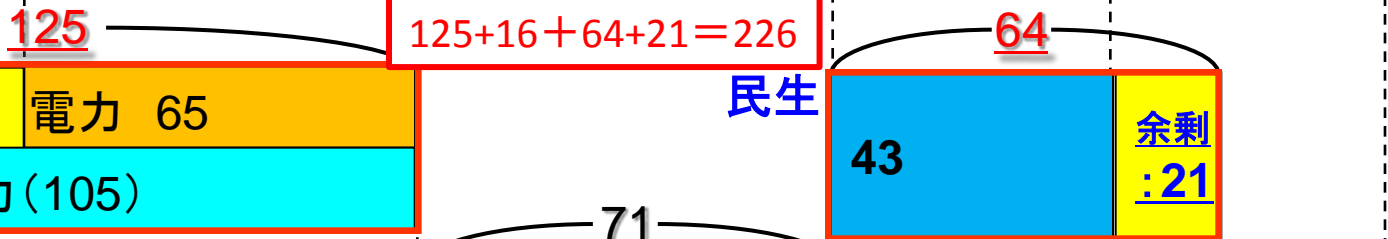
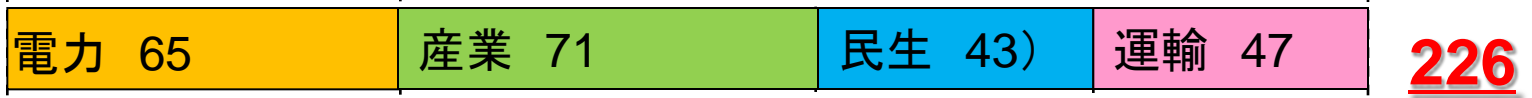
3. 15%削減の具体的打ち手

【単位：百万t-CO₂】

2005年CO₂排出実績

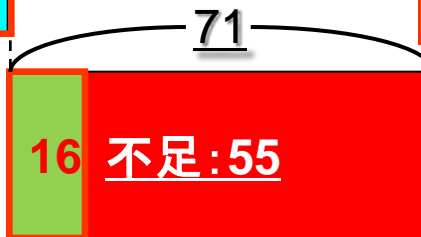


必要削減量
(同一比率削減時)



電力

産業



運輸



電力+産業 =
+60-55 = +5

民生+運輸 =
+21-26 = -5



MFTボタン

原子力は大丈夫か？

Thank You!

The End

