

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
Nuclear Safety Institute (IBRAE)



チェルノブイリ事故および福島事故を受けた 安全性改善へのロシアの取り組み

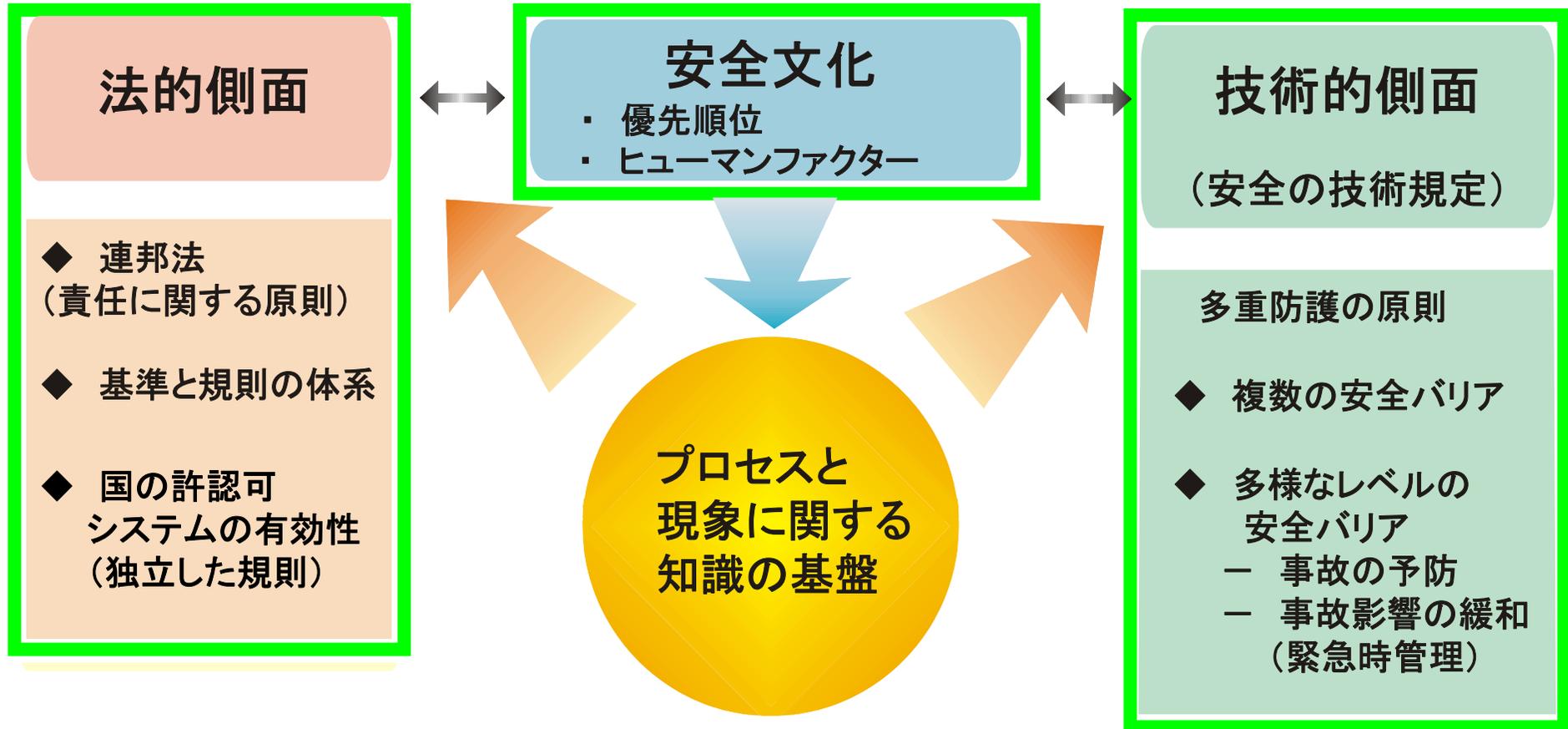
ロシア科学アカデミー原子力安全研究所
所長 レオニード ボリショフ

チェルノブイリ以降の取り組み

ソビエト連邦/ロシアは過酷事故(SA)への姿勢を変更:

- 科学的アプローチ
- 国際化
- 多重防護(DiD)およびモデルの研究
- シナリオ分析
- 規制の整合化(国際原子力安全諮問グループ[INSAG]-3)
- すべての原子力発電所の近代化
- ロシアの緊急時対応システムと国営原子力企業Rosatomの緊急時システムの更新

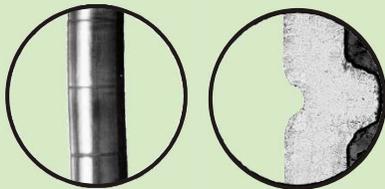
基本安全原則



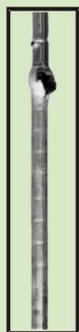
反応度事故 各種の燃料棒破損

クラッドの破損

燃料ペレット境界の
クラッド破損

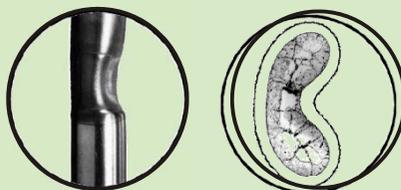


高燃焼度燃料(左)
および新燃料(右)
の燃料棒



クラッド破損を伴う
固有の膨張

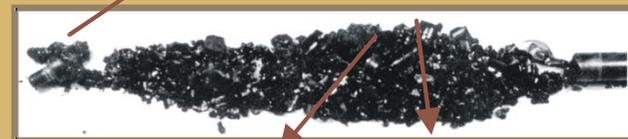
最大限に変形した
燃料棒の断面



燃料棒の破砕



鋳鉄が溶融した
下部プラグ



中心腔が溶融した
燃料ペレットの破片

冷却材喪失事故

RASPLAV計画



MASCA計画



容器内溶融の継続

- ❑ 炉心溶融物の熱物理特性に関するデータベースには、3,100 Kまでの温度のデータが含まれる
- ❑ 溶融プールの挙動を示す重要パラメータのデータベースが作成された
- ❑ 分析ツールが作成された

注) RASPLAV計画: OECD/NEAの国際計画。露クルチャトフ研究所で実施。

MASCA計画: RASPLAV計画の後継計画



ロシアの安全性概念の変遷 (INSAG-3)

■ 従来の安全性概念

1. 綿密な分析:
設計基準事故と想定起因事象
2. 設計基準事故の進展過程で登録される故障件数は、単一故障の原則に限定される

■ 新たな安全性概念

1. (炉心の完全溶融という重大な損傷に至る可能性のある)設計基準外事故の分析
2. 単一故障の原則は、設計基準外事故の分析中に見直される

安全性要件の策定

- さまざまな防護レベル要件の独立性を強化し、次の段階の事故発生の可能性を最小限に抑える
- すべての状態とモードでの放射線リスクを、同様の目的に使用される他の産業施設のリスクと比較できるようにする
- プラントサイトからの避難は必要ではない
- 原子力施設を配置する要件に、(他の産業施設と比較した)追加的制限は含めない

チェルノブイリ以降の取り組み

安全文化原則の採用

- 設計、建設、運転全般および日常管理における安全の優先
- 教育・訓練プログラム
- すべての発電所へのフル・スコープ・シミュレータ設置

チェルノブイリ以降の取り組み

除染と復興

- チェルノブイリ以降の汚染区域の除染
- 医療スクリーニング
- 1990年の特別防護対策
- 1994年の連邦プログラムの「人命救助から社会復興へ」の転換

チェルノブイリ原子力発電所での 水資源保護の効果と環境への影響

対策	局地的な ¹³⁷ Cs 放射能 (TBq)	費用 (100万ドル)	人数	個別費用 (ドル/MBq)	環境影響
ろ過ダムシステム	0.074~0.11	46	3000	420~620	4,000 hcの森林冠水
川床のろ過井戸	0.44~0.74	50	500	68~114	450万m ³ の砂捕捉。砂がキエフ貯水池水底の泥堆積物を覆う可能性がある
冷却池の隔離	< 0.037	> 100	> 1000	> 2700	チェルノブイリ原子力発電所サイトの地下水位上昇

被ばく線量低減に関連する防護手段の効率比較

対策	個人回避線量の範囲 (mSv)	低減される費用の範囲 (1人Sv当たりのドル)	経験 (場所、時期)
緊急避難	13,000～23,000	300～600	ウラル、1957年10月
	100～3,000	1,000～15,000	チェルノブイリ、1986年4月～5月
移住	40～200	6,000～100,000	ウラル、1958年11月
	50～100	130,000～500,000	チェルノブイリ、1990～1991年
子供と妊婦の移住	<1～40	4,000～400,000	チェルノブイリ、1986年5月～9月
隔離	5～100	0.02～1	プリピャチ、1986年4月26日および27日

チェルノブイリ原子力発電所事故以降の対策費用

対策	低減される費用の範囲 (1人Sv、人Gy当たりのドル)	経験 (場所、時期、母集団)
ヨウ素剤予防	0.02~0.1	1986年、プリピャチ住民
衛生処置	25~500	1986年、チェルノブイリ原子力 発電所区域
1週間の牛乳摂取禁止(子供)	1~15	1986年、ウクライナの汚染区域 の子供
現地食材の摂取制限および 管理	2,800~25,000 8,600~68,000 13,800~120,000	1986年、ブリャンスク地域 1987年、ブリャンスク地域 1989年、ブリャンスク地域

チェルノブイリの経験

汚染密度	平均線量 (mSv)	面積 (km ²)	人口 (1,000人)
> 15 Ci / km ² (555 kBq / m ²)	10	11000	85
> 40 Ci / km ² (1480 kBq / m ²)	40	3620	7

1991年の「チェルノブイリ法」に従い、1Ci / km²を超えるセシウムに汚染された土地が有害な土地に指定された。総面積は160,000 km²、人口は約300万人であった

チェルノブイリの経験から分かるとおり、放射線の根拠を欠く過剰な防護対策(主に避難)を講じると、否定的な心理的、社会的、経済的影響が急激に増加しかねない

従来からの問題

ソ連崩壊後の経済改革において、多くのバックエンドおよび従来からの問題が解決されつつある

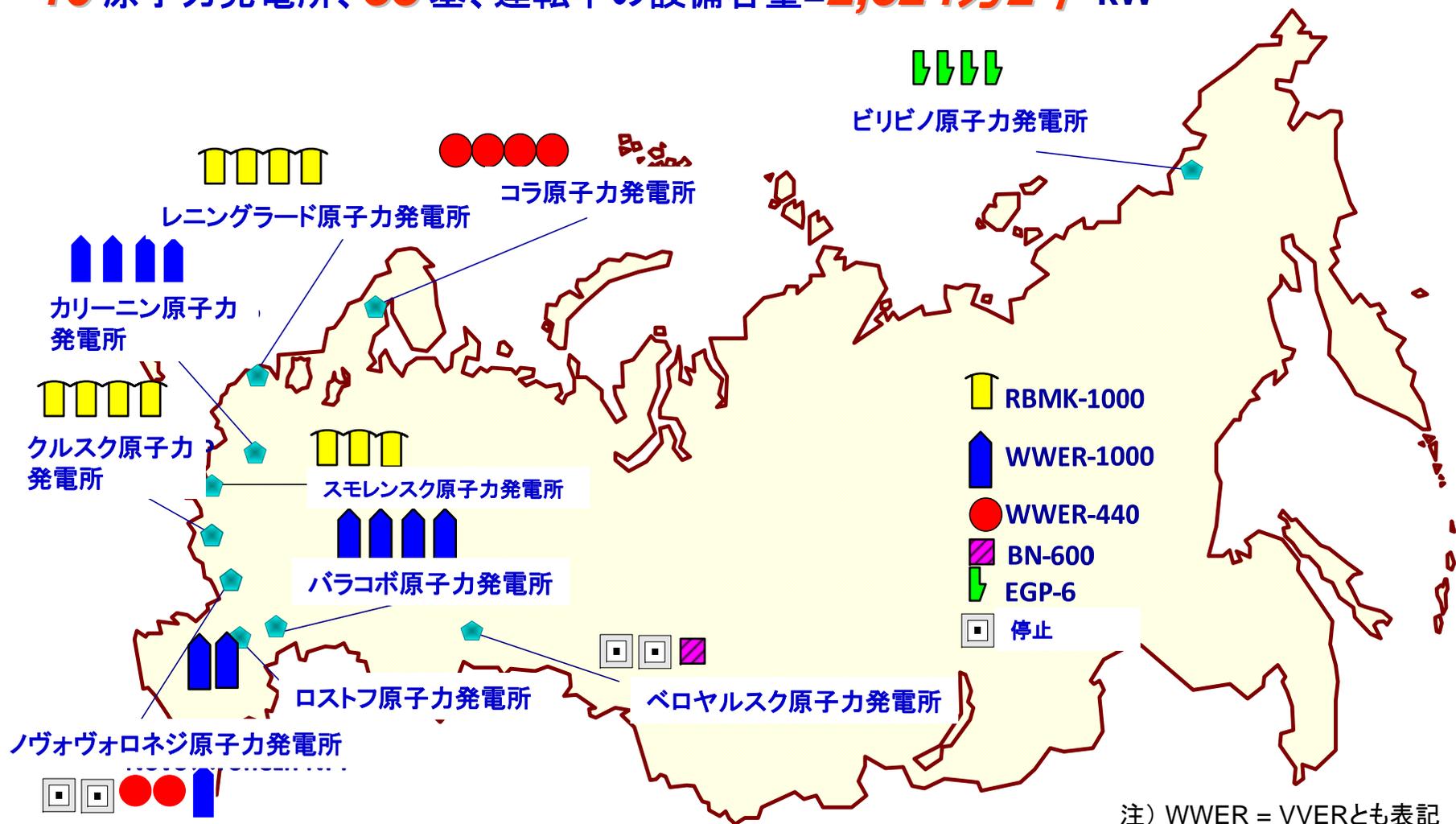
- 2008年以降、バックエンドおよび従来からの問題に対処する大規模な連邦プログラムが実施されている
- 廃棄物と使用済み核燃料(SNF)の貯蔵の安全性が改善された
- SNFの集中乾式貯蔵施設が建設された
- 放射性廃棄物管理に関する2011年連邦法では、すべての廃棄物の一時貯蔵の限度が定められ、最終処分が義務付けられた

ロシアの原子力プログラム

- VVER-1200の大規模な国内建設
(カリーニングラード、レニングラード - 2、ロストフ、
ノヴォヴォロネジ - 2、ニジニ・ノヴゴロド、クルスクなど)
- VVER-1200の海外建設(中国、インド、トルコ、ベトナムなど)
- クローズド燃料サイクルによる高速炉研究開発プログラム(ベロヤルスクBN-1200、BRESTなど)
- 中小型炉(SMR)(浮揚式、SVBR、VBR、VVER-640など)

ロシアの運転中の原子力発電所

10 原子力発電所、33 基、運転中の設備容量=2,524万2千 kW



原子力発電事業者－国営企業「Rosenergoatom」

Rosenergoatomは、1992年9月7日、ロシア連邦大統領命令により原子力発電事業者として設立された

33

－既存の発電プラント基数

25242

MWt

－設備容量

177.3

10億kWh

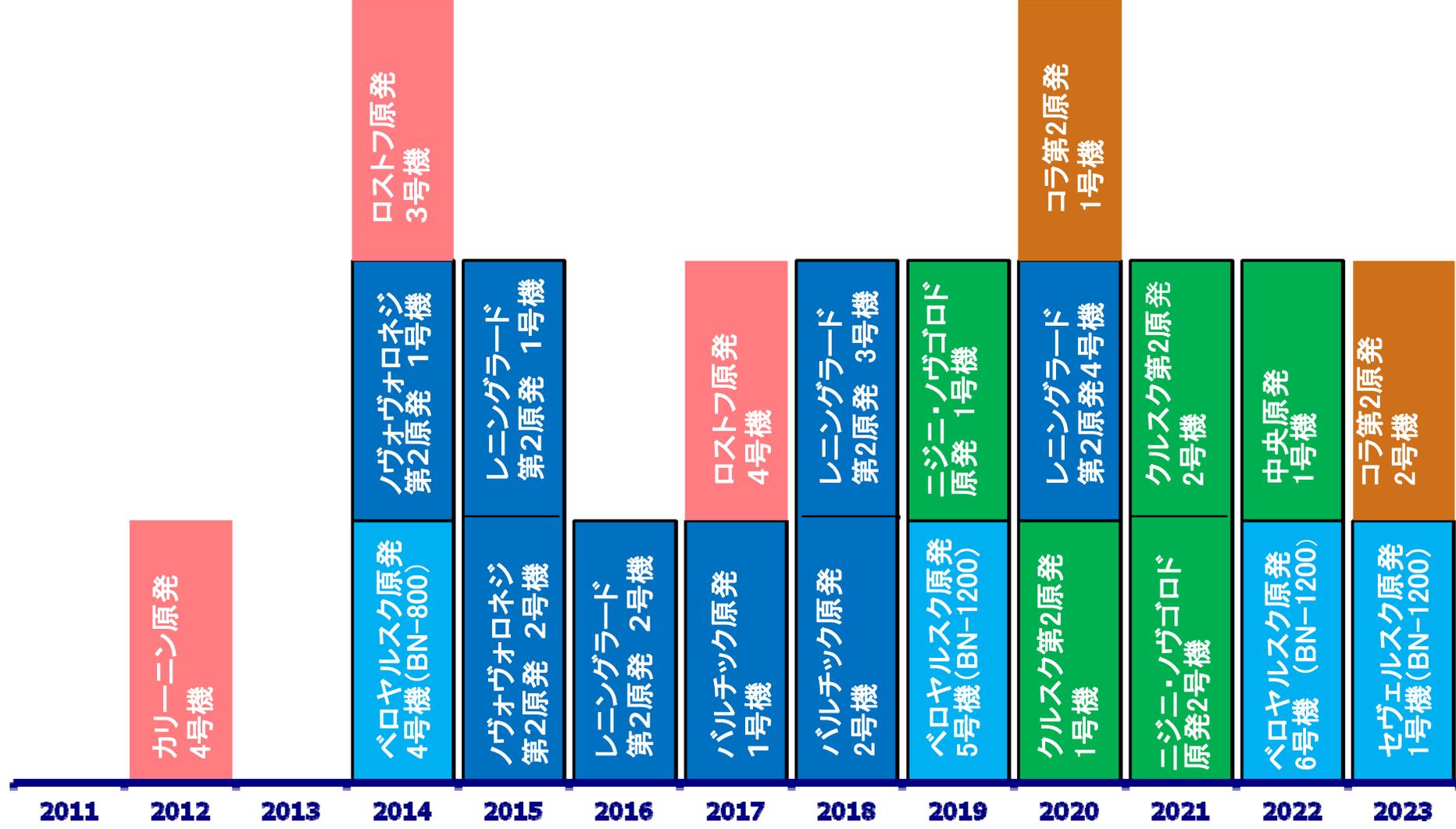
－2012年の発電量

35

1,000人

－Rosenergoatomの従業員数

ロシアの原子力発電ロードマップ



公表データに基づく放射線事故の死亡と早発性効果の発生件数 (悪意のある行為や核実験を除く)

事故の種類	1945-1965	1966-1986	1987-2007	合計	報告の完全性に関する委員会の意見
原子力施設での事故	46件の早発性効果	227件の早発性効果 *	2件の早発性効果	275件の早発性効果	死亡者の大半と負傷者の多くが報告されたと考えられる
	16件の死亡	40件の死亡 *	3件の死亡	59件の死亡	
職業災害	8件の早発性効果	109件の早発性効果	49件の早発性効果	166件の早発性効果	多くの死亡者と負傷者が報告されていない可能性がある
	0件の死亡	20件の死亡	5件の死亡	25件の死亡	
紛失線源に関わる事故	5件の早発性効果	60件の早発性効果	204件の早発性効果	269件の早発性効果	多くの死亡者と負傷者が報告されていない可能性がある
	7件の死亡	10件の死亡	16件の死亡	33件の死亡	
研究プロジェクトでの事故	1件の早発性効果	21件の早発性効果	5件の早発性効果	27件の早発性効果	多くの死亡者と負傷者が報告されていない可能性がある
	0件の死亡	0件の死亡	0件の死亡	0件の死亡	
医学利用での事故	データなし	470件の早発性効果	143件の早発性効果	613件の早発性効果	多くの死亡者とかなりの負傷者が報告されていないことが明らかになっている
	データなし	3件の死亡	42件の死亡	45件の死亡	
合計					
早発性効果	60	887	403	1350	
死亡	23	73	66	162	

表10 UNSCEAR 2008報告書の付録R.671のp.52

1969～2000年のエネルギー部門における 大規模(犠牲者数5人以上)事故の概要データ

種類	OECD加盟国			非OECD加盟国		
	事故	犠牲者数	犠牲者/ GW	事故	犠牲者数	犠牲者/ GW
石炭	75	2259	0.157	1044	18 017	0.597
石炭 (中国のデータ、 1994～1999年)				819	11 334	6.169
石炭(中国を除く)				102	4831	0.597
石油	165	3713	0.132	232	16 505	0.897
天然ガス	90	1043	0.085	45	1000	0.111
石油およびガス	59	1905	1.957	46	2016	14.896
水力	1	14	0.003	10	29 924	10.285
原子力	0	0	-	1	31*	0.048
合計	390	8934		1480	72 324	

* 即死のみ

問題の原因

- 主な安全目標：公衆を過剰な被ばくから保護することが適切になされていない
- 公衆の理解力不足、衛生規則の相互矛盾、意思疎通不足の結果、放射線影響が低いか、またはまったくなかったにも関わらず、炉心溶融事故であったがために、大規模な影響を及ぼすことがよくあった。

福島第一原発事故の概略

1. 福島事故に寄与した以下の多くの要因が事故以前に特定されていたことが明らかになっている
 - 過酷事故管理計画の構造が弱体
 - 安全性の改善が欠如
 - 外的危険要因の評価が不十分
 - 規制制度が脆弱
 - 緊急時対応準備の担当者の訓練が欠如
2. これらの不備に対処するために必要な処置が不適切だった

多重防護の効率に関する試験が行われている



1
—ロシアで運転中の各発電ユニットを対象とする

2
—原子力発電所への、立地地域に特有の極端ではあっても確からしいあらゆる影響を考慮する

3
—極端な影響のさまざまな組合せを考慮する

詳細な評価の結果

1



これまでの10～15年間、原子力発電所の安全性向上を目的とした強化作業が実施されている

2



それぞれの原子力発電所について、脆弱性と初期事象が明らかになっている

3



原子力発電所の堅牢性を強化することを目的とした補完的対策を実施する必要がある

4



運転中の原子力発電所の設計時に、必ずしもすべての設計基準外事故(BDBA)が考慮されなかった

- ➡ 原子炉炉心からの熱除去の全ての試みの失敗
- ➡ 原子力発電所の外部電源への接続の完全かつ長期(10日間以上)にわたる失敗
- ➡ 2つ以上の独立した初期事象の組み合わせ

ロシアの原子力発電所の安全性を向上させるための追加的対策

短期的な処置

- 過酷なBDBAを排除するために使用する移動式の設備を購入してプラントに装備する
 - ディーゼル発電機
 - ディーゼル駆動ポンプ
 - モーター駆動ポンプ

中長期的な処置

- それぞれの原子力発電所で、特有の補完的設計に基づく解決策を分析、開発し、実施する

原子力発電所への移動式非常用機器の導入

2012年、ロシアの10カ所の原子力発電所に、
以下の機器が納入された



31台

移動式ディーゼル発電機
2.0 MW (6kV; 0.4 kV; 220
V DC)



36台

移動式ディーゼル発電機
0.2 MW (0.4 kV)



35台

移動式高圧ポンプユニット
(各種容量・上部圧力)



80台

エンジン駆動ポンプ
(各種容量・上部圧力)

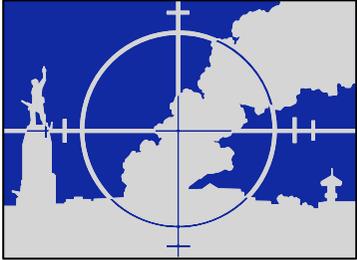
182台

合計 :

問題の規模

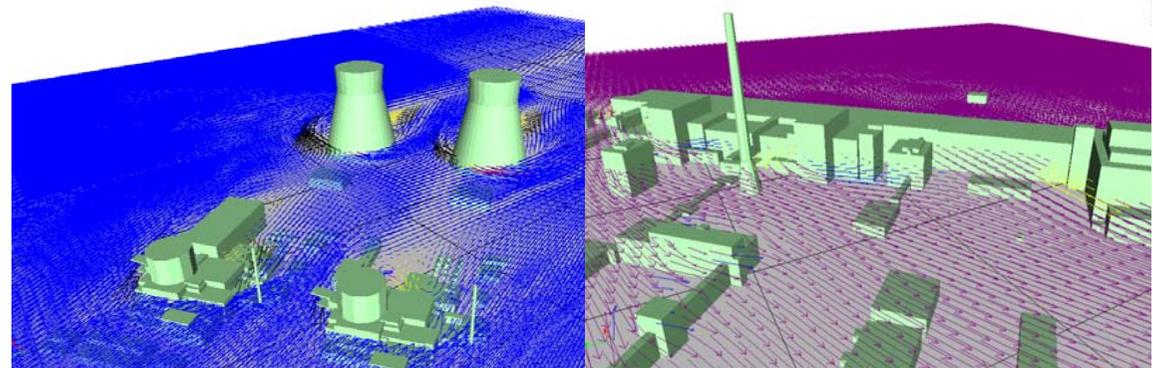
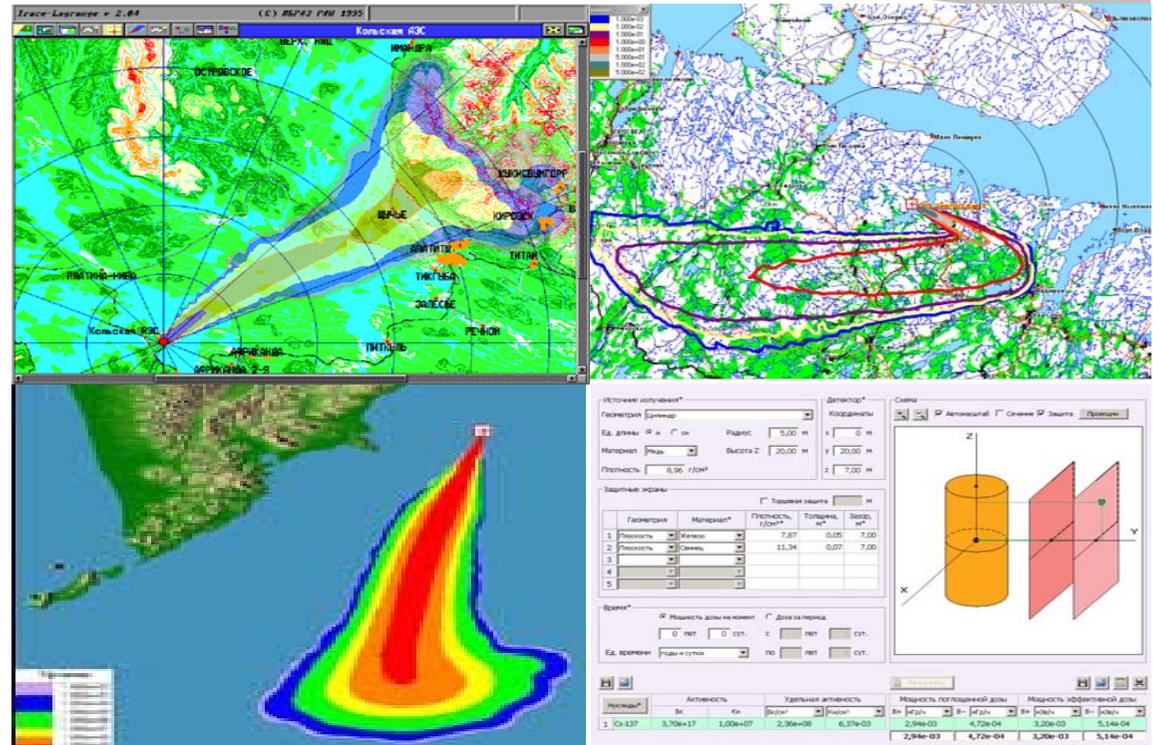
軍事用の原子力と平和な原子力の犠牲者について、何を知っているか？

研究者

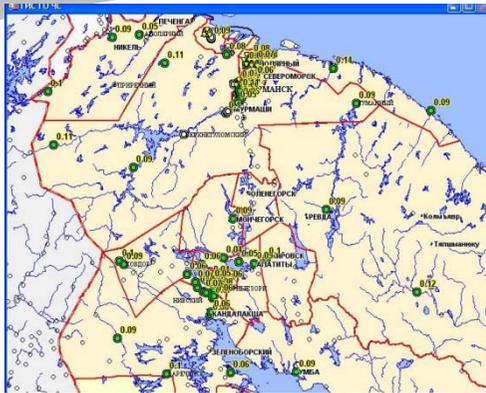
出来事	犠牲者の実数	研究者の評価
 広島	21万人の即死	約30万人
	86,572人の被爆者の間接的影響－ 421人	75万人
 チェルノブイリ	31人の即死・それに準じる死	4万人
	間接的影響(解体作業者と住民) 約60人	25万人

ソフトウェアおよびハードウェア・システム (SHS)

- 放射線事故の環境(大気、水)と住民への影響を評価するために国営企業「Rosatom」の救助隊に提供されるSHS
- 複雑な産業環境での放射線事故の影響を評価するために3-Dモデルを備えたSHS



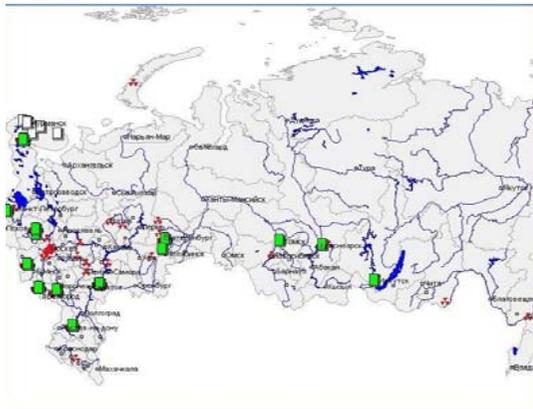
ロシア連邦での緊急対応および放射線モニタリングシステム



ロシア連邦では、運転中または建設中の原子力発電所がある地域では、地方自治体の機能を支援し、原子力発電所運転の安全性を実証するため、「地域システム」が創設されている(緊急時対応準備および独立した放射線モニタリングシステム)

業務範囲:

- 危機管理センターの設置
- 地域的な放射線モニタリング自動システムの設置
- ソフトウェアおよび技術システムの開発と設置
- 移動式の実験施設の導入
- 演習と訓練の実施

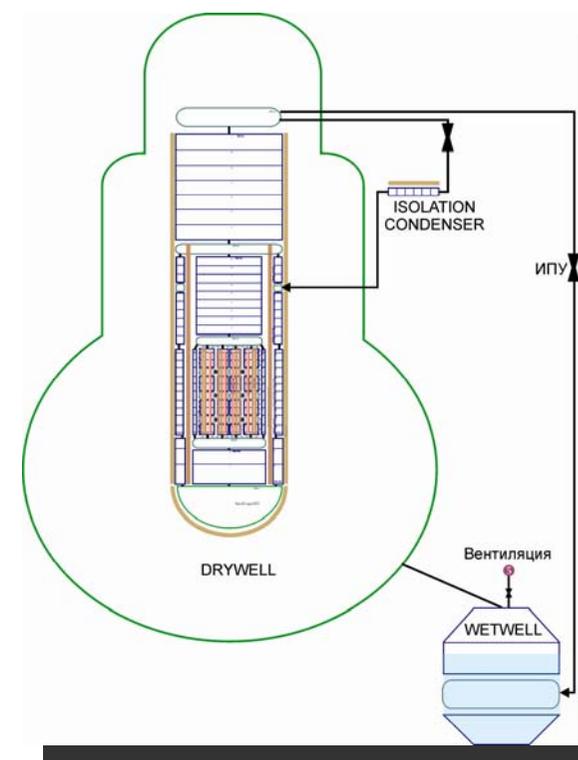


福島第一原子力発電所1～3号機および4号機 使用済み燃料プールの事故解析(SOCRAT)

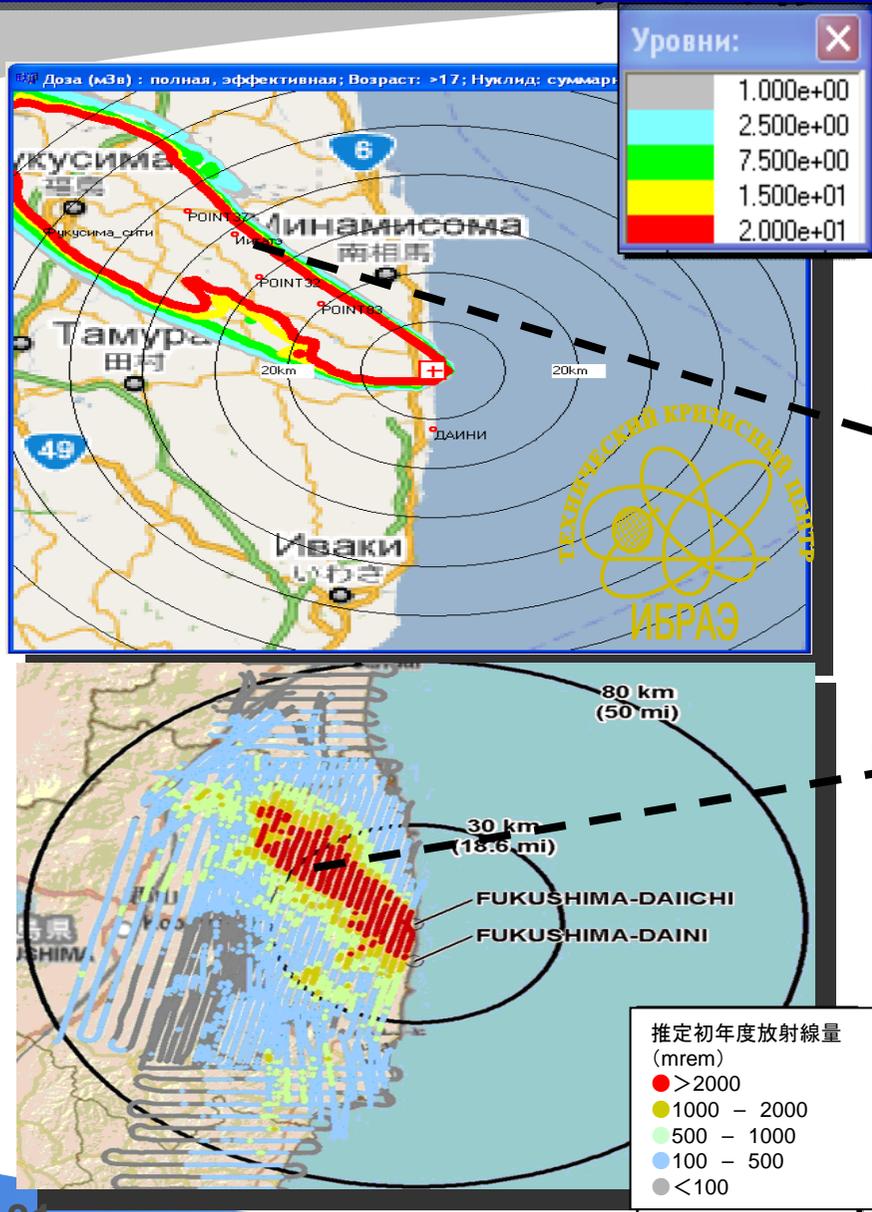
冷却水は考慮しない

	計算上の爆発時刻 (日本時間) (1、2、4号機の水素)		実際の爆発時刻 (日本時間) (1、2、4号機の水素)	
	日	時刻	日	時刻
1号機	12.03	15:16	12.03	15:36
2号機	容器内の圧力超過		15.03	06:14
	15.03	05:45		
3号機	14.03	08:00	14.03	11:01
4号機 (燃料プール)	15.03.	4:00-05:00	15.03.	6:00

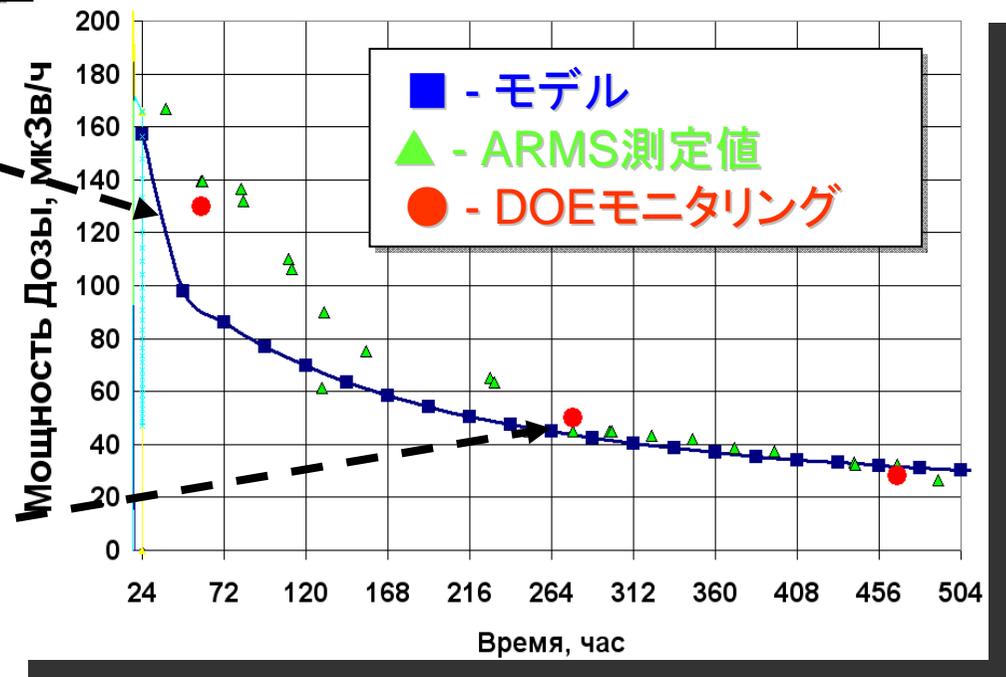
SOCRATコードの
原子炉BWR/3計算モデル



日本の詳細な気象データによる 大気移動モデル化



モデル化の結果とモニタリングデータ



福島を経験

福島原発事故以降に、住民の予想年間線量が
20 mSvおよび100 mSvを超える区域と人口

			予想年間線量 (mSv/年)	
			> 20	> 100
20 km圏内	面積 (km ²)	合計	327	101
		居住地域	109	24
	人口	43 700	8750	
20 km圏外	面積 (km ²)	合計	368	53
		居住地域	84	11
	人口	16 300	4000	
合計	面積 (km ²)	合計	695	154
		居住地域	193	35
	人口	60 000	12 550	

福島の実験

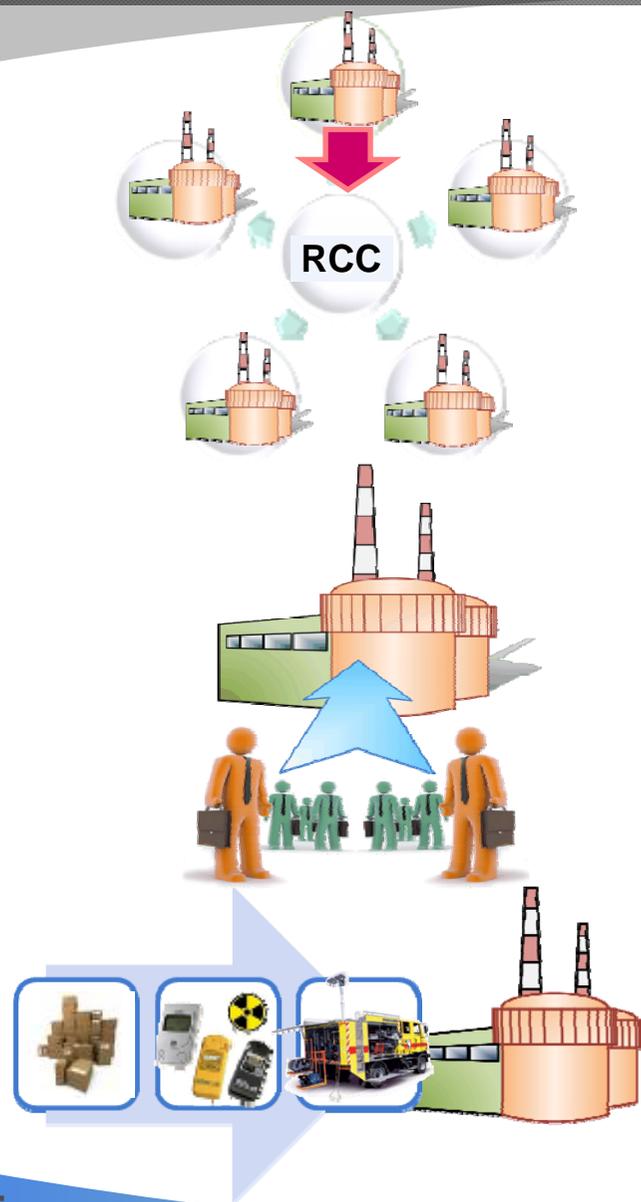
防護措置に関する勧告

- 日本の領土の大部分で、事故後20日間の国民に対する総被ばく線量は0.1 mSvを超えなかった。防護措置は不要である。
- 最も汚染が激しかった茨城県の20日間の県民の総被ばく線量は0.6～1.0 mSvに達した。最初の1カ月間に関しては、牛乳や野菜の汚染管理などの防護措置が推奨される。
- 20 kmの境界沿いの北西部では、20日間の最大線量が50 mSvに達した可能性がある。防護措置を講じない場合の最初の1年間の予想線量は、合計150 mSvに達した可能性がある。住民の避難は正当と認められない。放射能除去、食材と水の通常の汚染管理、その他の対策が推奨される。

ロシア型加圧水型原子炉（VVER）を運転する原子力発電所向けのWANO地域危機管理センターの設置



地域危機管理センターの目的



1. 原子力発電所で事故または重大安全事象が発生した場合に、WANOモスクワセンター加盟会員間で信頼できる情報を早期に通知・交換すること

2. 原子力発電所の緊急要請を受けて、リアルタイムの協議を行い、早期の工学および技術支援を提供する専門家委員会を設置すること

3. 原子力発電所の緊急要請を受けて、WANOモスクワセンター加盟会員の支援として、物資と技術的資源を早期に提供するための仕組みを確立すること

何をなすべきか？

- 重大な影響を伴う可能性の低いシナリオの詳細な安全解析
- 検討しなければならない事故と無視してもかまわない事故に関する世界的なコンセンサス
- 可能性が低い重大な事故については、防護対策を含める必要がある
- 放射線影響と規制の間にある100倍の溝を埋める必要がある
- 情報公開は、原子力エネルギー利用の不可欠な部分である
- 国立の技術センターは、放射線事故への緊急時対応を支援するべきである

結論

- 重大だが可能性の低い事故も考慮に入れ、決定論的方法によって事故を防止する
- 緊急時対応について、万全の準備を整えておく
- 放射線防護のルールを明確化する
- 放射線と原子力技術の安全性を巡る問題への公衆の参加を実現する