

平成20年9月26日

リスク工学グループ演習

PSAによる原子力プラントの 信頼性解析とその活用

リスク工学専攻 グループ演習7班

加藤悠太, 豊田安由美, 本田航, 長谷川雄士

(指導教員) 岡島敬一, 内山洋司, 村松健

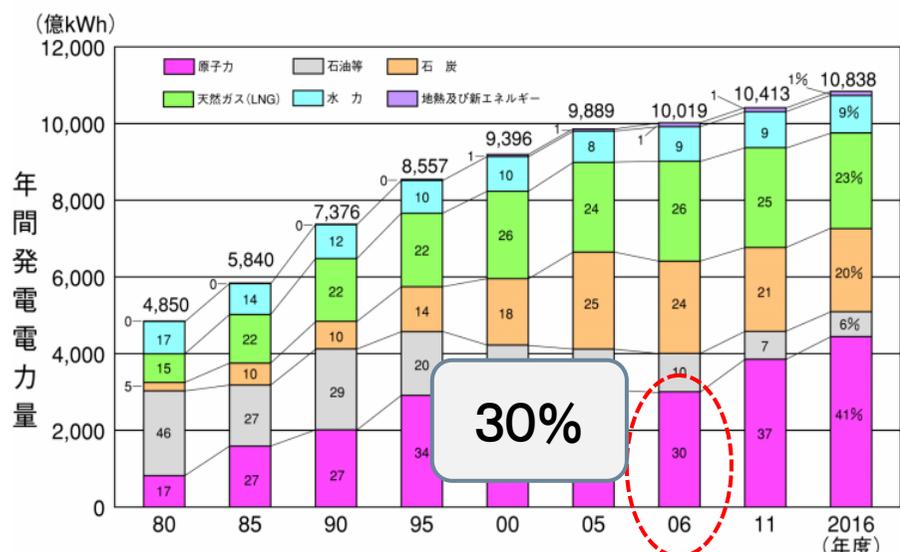
背景·目的

注目される原子力発電

原子力発電

- 電力生産量全体の約3割を担う基幹電源(2006)
- 発電時にCO₂をほとんど排出しない

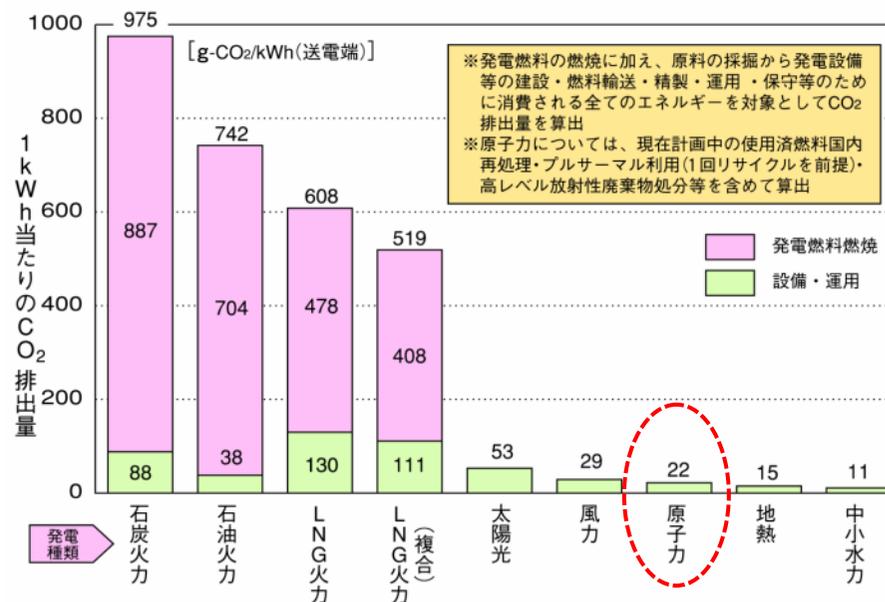
電源別発電電力量の実績および見通し



(注) 1.石油等にはLPG、その他ガスおよび瀧青質混合物を含む。
 2.四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある。
 3.発電電力量は10電力会社の合計値(受電を含む)
 4.グラフ内の数値は構成比(%)を示す。

出典：平成19年度供給計画の概要(平成19年3月)他

各種電源別のCO₂排出量

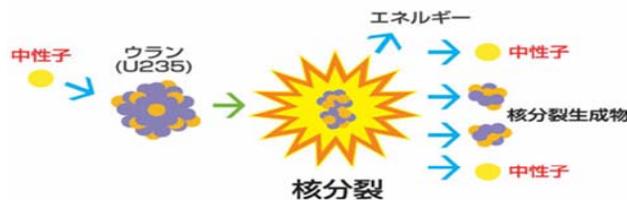


※発電燃料の燃焼に加え、原料の採掘から発電設備等の建設・燃料輸送・精製・運用・保守等のために消費される全てのエネルギーを対象としてCO₂排出量を算出
 ※原子力については、現在計画中の使用済燃料国内再処理・プルトニウム利用(1回リサイクルを前提)・高レベル放射性廃棄物処分等を含めて算出

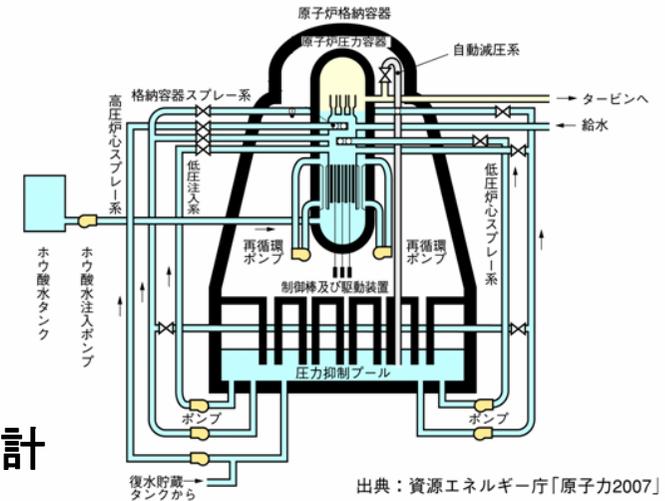
出典：電力中央研究所報告書 他

PSAと安全設計

○原子力は放射性物質を扱うため
高い安全性と信頼性が求められる



多重防護設計



出典：資源エネルギー庁「原子力2007」

○確率論的安全評価 (Probabilistic Safety Assessment: PSA)

複雑システムの安全性を総合的・定量的に評価する手法 (詳細後述)

- 炉心損傷頻度 (Core Damage Frequency: CDF) 「 10^{-4} /年」
安全目標達成を確保するための性能目標：内閣府原子力安全委員会
- 定期安全レビューにPSA活用を推奨
原子炉運転開始後10年ごとを目安に電力事業者自ら安全性をレビュー



PSAの詳細な分析過程、プラント構成多重化の有効性、
安全対策の費用対効果は一般に周知されていない

原子力と社会受容

○不十分な社会受容

- 新潟県旧巻町原子力発電所計画の撤回（2003.12）
- 核燃料廃棄物処分場問題（未決定） …

原子力に関する社会意識調査研究

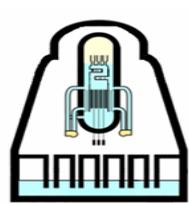
- ① リスク認知に関する研究－原子力発電所所在地住民の原子力発電に対する態度（申紅仙，正田亘 2000）
- ② 原子力発電に対する日本人の意識（林知己夫 1995）
- ③ 原子力発電に関するリスク認知の規定因に関する考察（角田勝也 1999） …



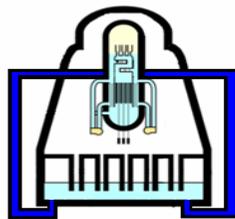
PSAにより算出した炉心損傷頻度やそれに基づく
安全対策費用等の数値指標を用いた社会意識調査
はほとんどなされていない

研究概要

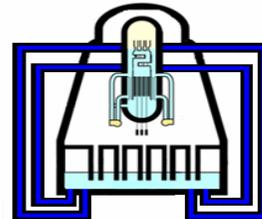
- ① 解析研究： 多重性変化 ⇒ 炉心損傷頻度への影響
(PSAの実施)



0系統



2系統



4系統

信頼性解析ソフト
Relax Reliability Studio 2007
によるシミュレーション

※ 対象系統は全国の原発のトラブルを調査し決定する。

- ② 調査研究： 多重性変化による炉心損傷頻度の変化
費用・事故時被害額(期待値)等



原子力発電安全対策に関する社会意識
(PSA結果の活用とその検証)

PSAとは

確率論的安全評価(PSA)とは？

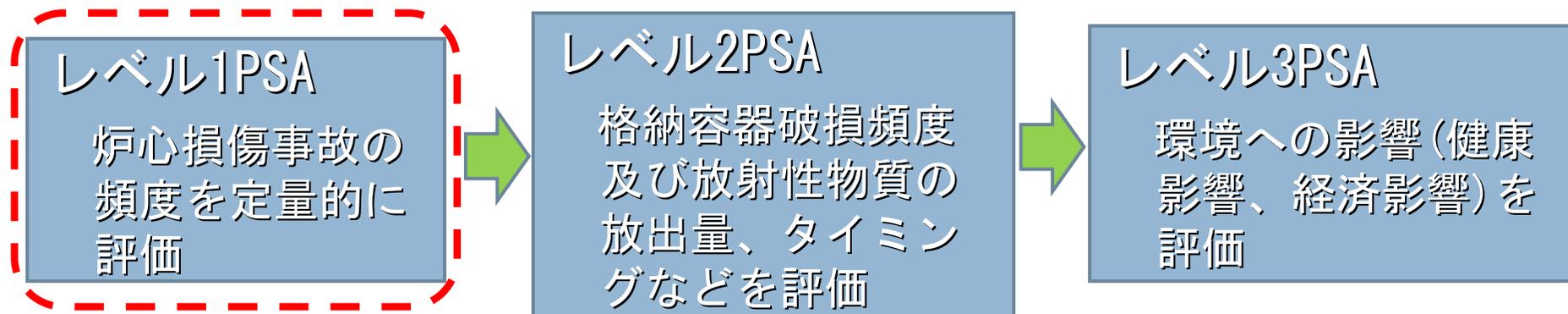
確率論的安全評価 (Probabilistic Safety Assessment: PSA)

- 複雑なシステムの安全性を総合的かつ定量的に推定する方法
- 発生しうる事故を対象に次の3つの要素を定めることにより安全性を評価

①事故シナリオ ②発生頻度 ③被害の大きさ

原子力発電所に対するPSA

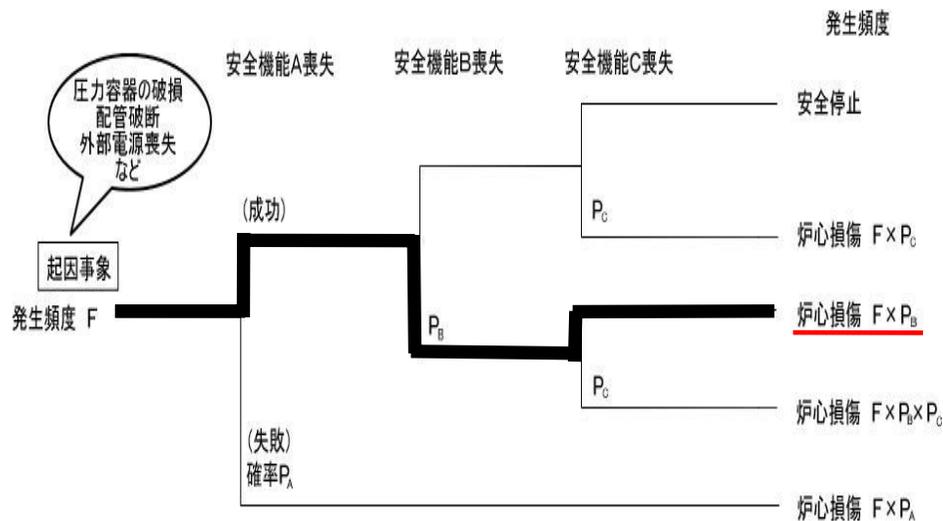
- 炉心損傷事故を対象とし3つの段階により安全性を評価



レベル1PSA (1)

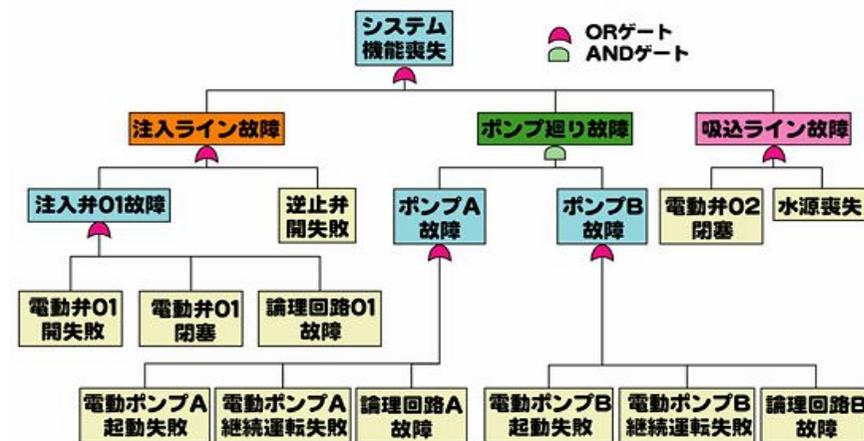
1. イベントツリー解析

- 起因事象から炉心損傷に至る事故シーケンスを系統的に洗い出す



2. フォルトツリー解析

- 頂上事象に至る様々な事象の組合せをツリーで表現しその発生頻度を算出



各機器故障率を代入

トラブルマップ

トラブルマップ(対象システムの選定)

トラブルマップ：国内の原発のトラブルを網羅し、発生箇所・影響度で分類

➤ トラブル情報 原子力施設情報ライブラリー(NUCIA)

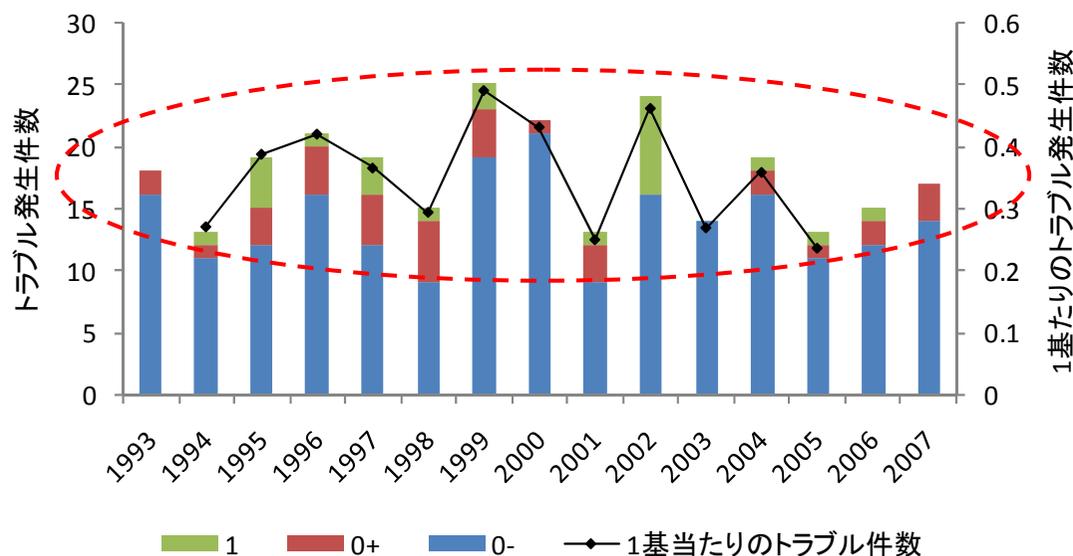
➤ トラブル概要

対象トラブル	285件(1993年1月1日～2008年7月25日)	
1)発生箇所	設備	18分類
	系統	78分類
2)事故影響度	INES評価	8段階

➤ トラブル件数
経年変化

年間12～15件
1基当たり0.2～0.5件

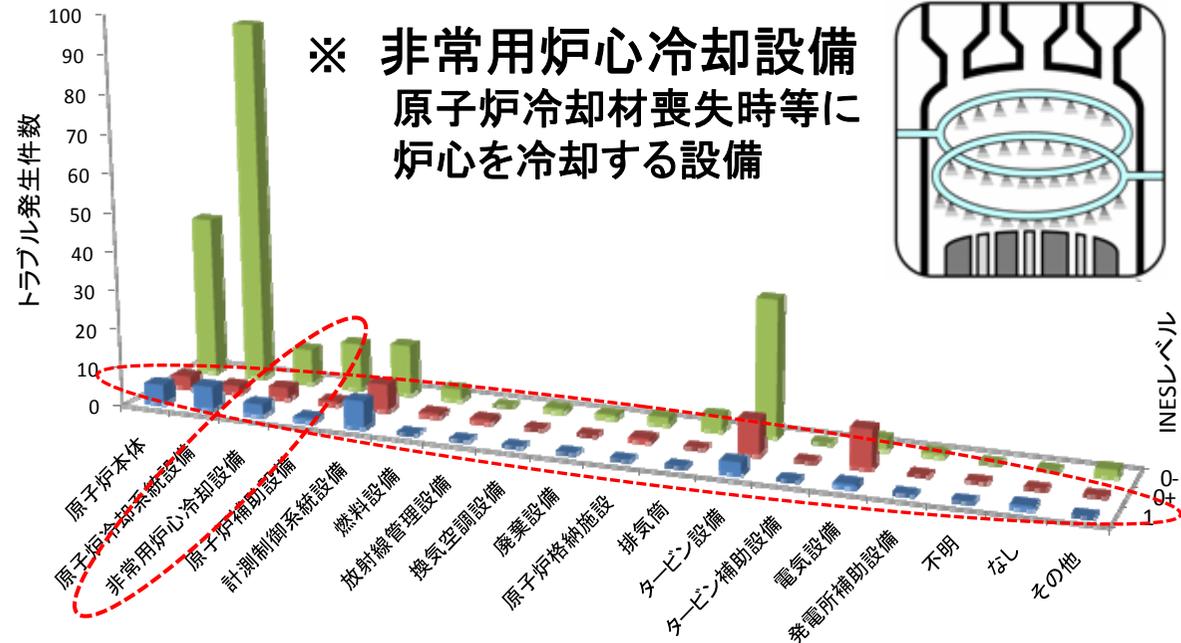
大きな増加・減少
傾向は見られない



トラブルマップ(対象系統の選定)

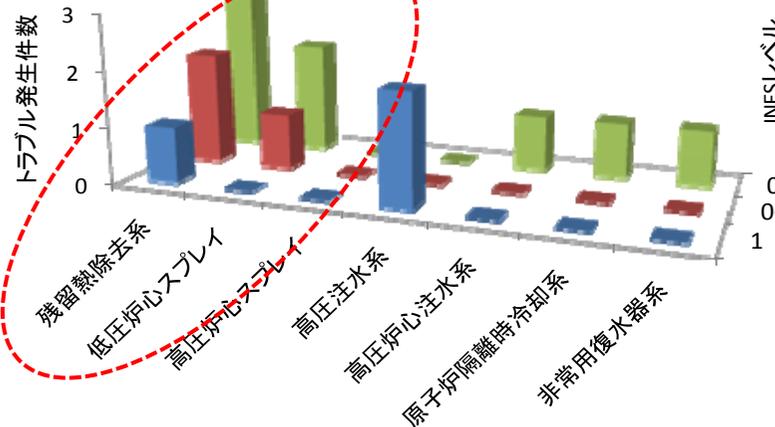
➤ 系統別トラブル (全285件)

**非常用炉心冷却設備を
対象設備に決定**



➤ 非常用炉心冷却設備におけるトラブル (全14件)

**低圧炉心スプレイ系、
残留熱除去系
を対象系統に決定**



非常用炉心冷却設備

- 低圧炉心スプレー系
炉心を上部からスプレー冷却する
(1系統)
残留熱除去系

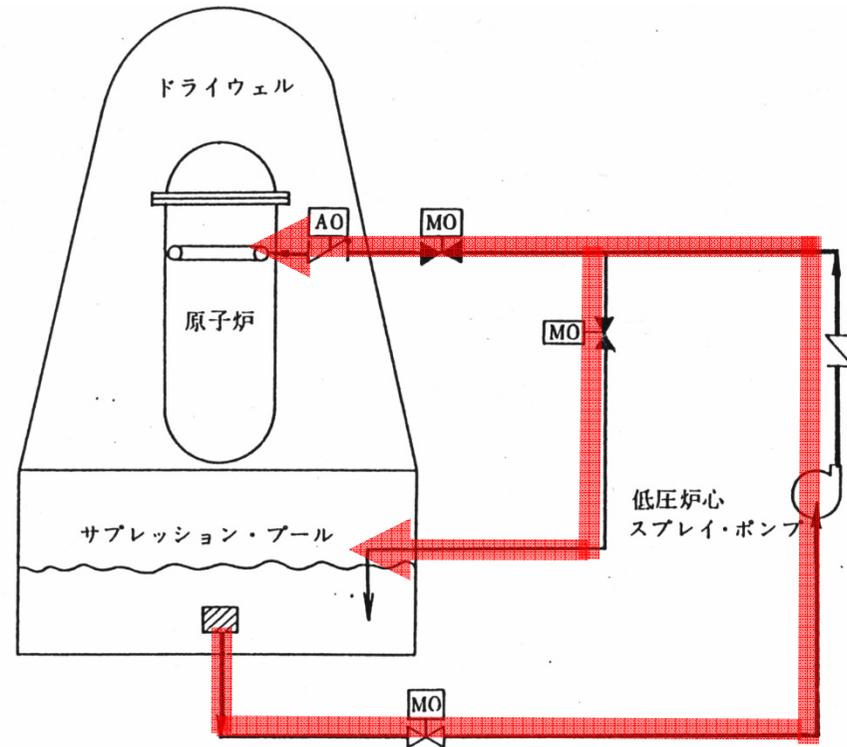
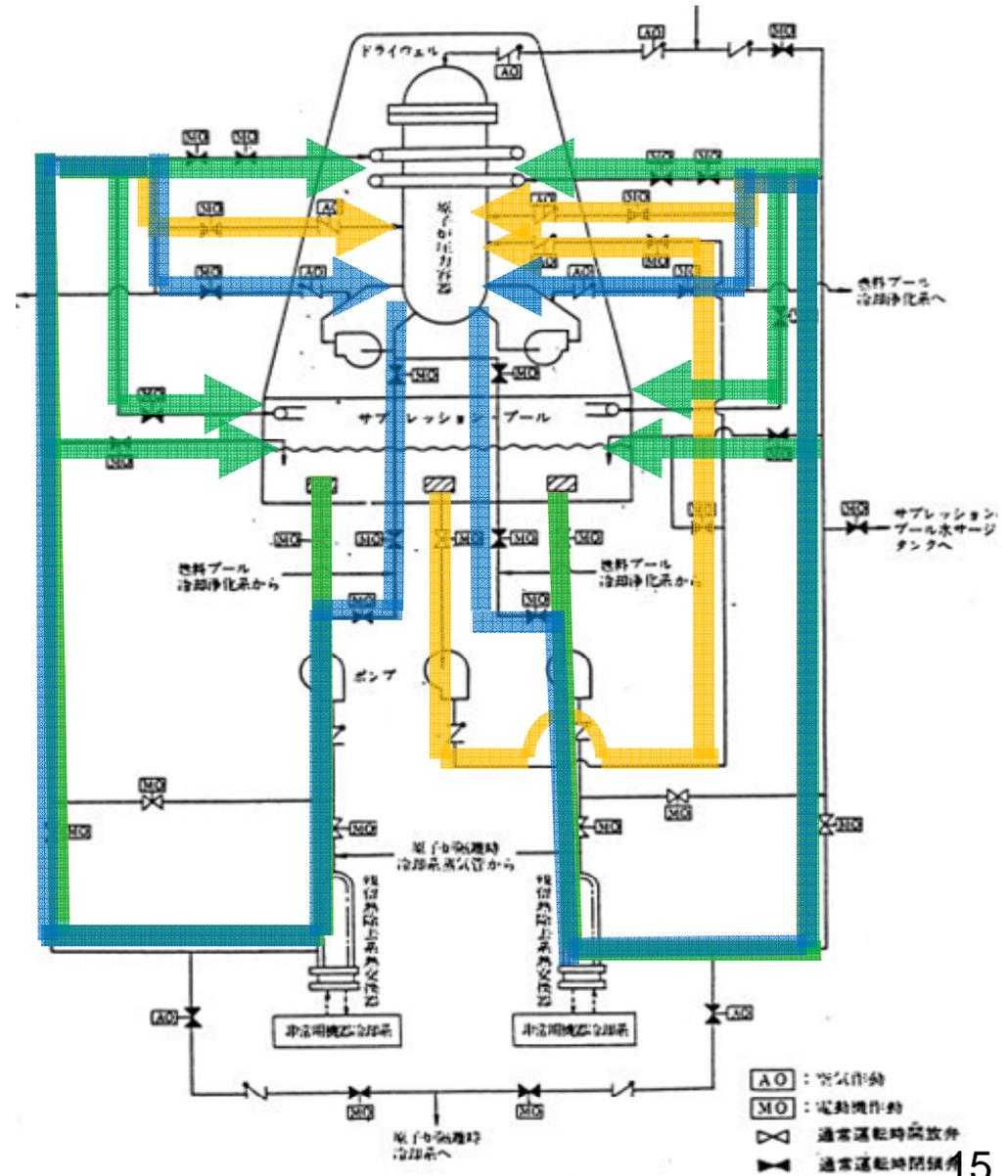


Fig. 5.10 低圧炉心スプレー系系統概要図⁽⁸⁾

非常用炉心冷却設備

- 低圧炉心スプレー系
炉心を上部からスプレー冷却する
(1系統)
- 残留熱除去系
- 低圧注入系
プール水を直接炉心に注入(3系統)
- サプレッションプール冷却系
原子炉からの蒸気を冷却
プール水を冷却(2系統)
- 停止時冷却系
原子炉内の冷却材を冷却(2系統)

4系統を対象に
多重性変化を行う



PSAの実施

Relex

システムの信頼性解析を行うための汎用ソフトウェア

本研究では

- フォルトツリー解析
 - イベントツリー解析
- の2機能を使用

The screenshot shows the Relex software interface. The top window is titled 'Relex - [グループ演習 System-1]PC(ABJ.03)'. Below the title bar is a menu bar with 'File', 'Edit', 'View', 'Insert', 'Tools', 'System', 'Fault Tree', 'Tree', 'Window', and 'Help'. The main workspace is divided into several panes. The top pane is the 'Fault Tree Table', which contains a table with the following data:

Identifier	Gate/Event Type	Description	Logical	Input Type	Failure Rate ...	Exposure Ti...	Dormancy F...	FR Percentage	Input Value	Input Value 2	Units
13	Gate97	OR Gate	Pump	Normal	100.00			100.00			
14	Gate98	OR Gate	Pump Outlet CKV	Normal	100.00			100.00			
15	Gate99	OR Gate	Injection Line Failure	Normal	100.00			100.00			
16	Gate110	OR Gate	SDC(JPCI Line Failure	Normal	100.00			100.00			
17	Gate114	OR Gate	SDC(停止維持冷却)機能喪失	Normal	100.00			100.00			
18	Gate115	OR Gate	吸い込みライン故障	Normal	100.00			100.00			
19	Gate120	OR Gate	ポンプ室の故障	Normal	100.00			100.00			
20	Gate122	OR Gate	注入ライン故障	Normal	100.00			100.00			
21	Gate127	OR Gate	熱交換器の故障	Normal	100.00			100.00			

The bottom pane is the 'Fault Tree Diagram', which shows a hierarchical tree structure. The top event is 'SDC(停止維持冷却)機能喪失' (Gate114). Below it are several intermediate gates, including '注入ライン故障' (Gate122), '熱交換器の故障' (Gate127), 'ポンプ室の故障' (Gate120), and '吸い込みライン故障' (Gate115). The diagram further breaks down these gates into basic events, such as 'NPRD-12201' (Event235), '管線/リフト (Tube/Shaft)' (Event238), '容器 (Tube)' (Event239), 'NPRD-12201' (Event240), '閉塞' (Event243), '管線/リフト' (Event244), 'NPRD-12201' (Event245), '管線/リフト' (Event247), 'NPRD-12201' (Event248), and 'NPRD-12212' (Event252). The diagram uses various symbols to represent gates (triangles) and events (circles).

機器故障率データ

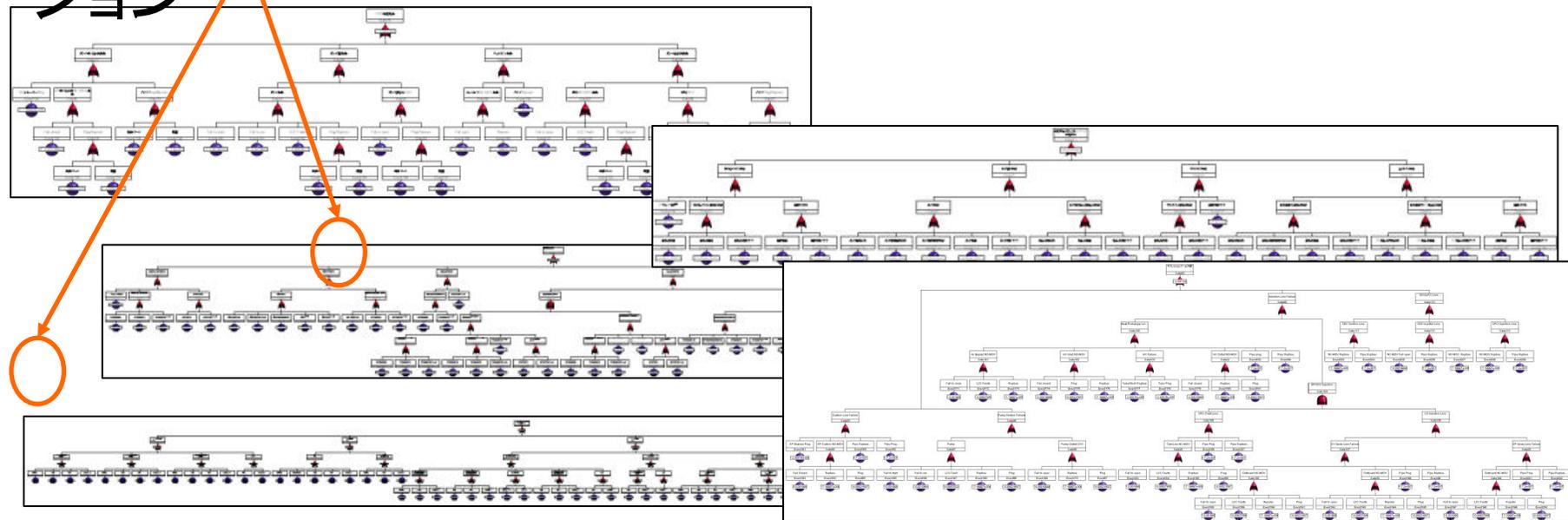
<p><u>NPRD-95</u> (Non-electronic Parts Reliability Data 1995, System Reliability Center)</p>	<ul style="list-style-type: none">・米国の軍用から商用まで幅広い種類の機器の故障率を集めたデータベース
<p><u>NUREG/CR-2802</u> “Interim Reliability Evaluation Program: Analysis of the Browns Ferry, Unit 1, Nuclear Plant”, 1982</p>	<ul style="list-style-type: none">・ United States Nuclear Regulatory Commission発行の報告書・ 米国Browns Ferryの原子炉に対してのPSA実施
<p><u>NUCIA</u> (Nuclear Information Archives) “原子力機器故障率16ヶ年49プラント”</p>	<ul style="list-style-type: none">・ PSAに使用することを目的として1982-1997間に収集、評価された原子力用機器故障率データ http://www.nucia.jp/NRIA/REPORT/PDF/P00001.pdf

機器故障率とシステム信頼性

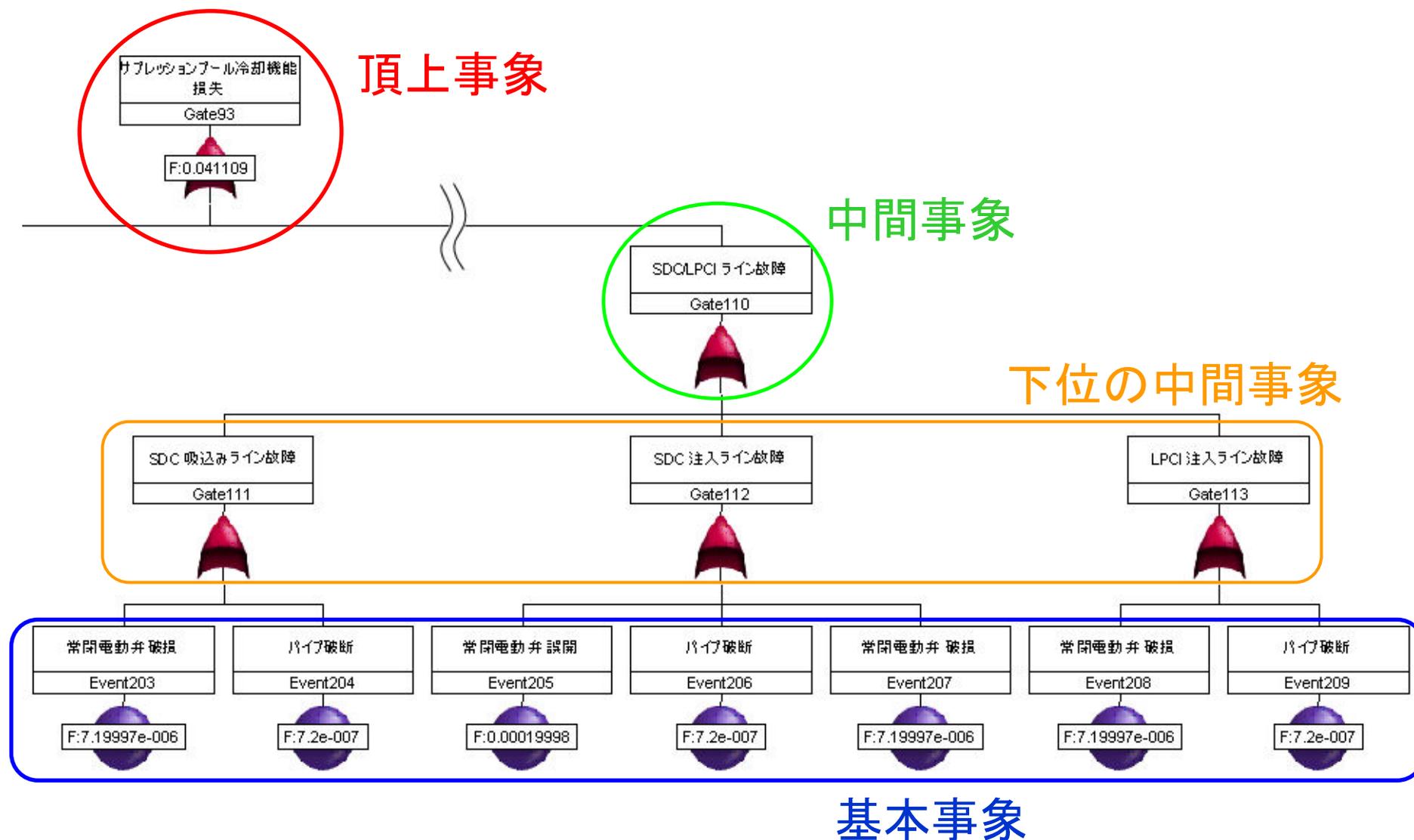
- 低圧炉心スプレー系、低圧注入系、サプレッションプール冷却系、停止時冷却系のフォルトツリーを作成



- 故障イベントの発生確率にNPRD-95, NUREG, NUCIAの機器故障率を代入、1ヶ月運転のシミュレーション



機器故障率とシステム信頼性



機器故障率とシステム信頼性

□ 解析結果

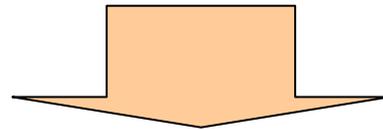
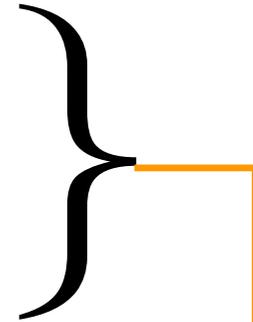
系統	NPRD-95	NUREG	NUCIA
低圧炉心スプレー系	1.42E-01	3.93E-02	3.74E-04
低圧注入系（独立系）	1.42E-01	3.93E-02	3.74E-04
低圧注入系（共有系）	2.52E-01	3.95E-02	3.77E-04
サプレッションプール冷却系	2.99E-01	4.11E-02	3.79E-04
停止時冷却系	3.75E-01	8.32E-02	4.52E-04

- 汎用機器(NPRD-95)と原子力用では10～1000倍程度の差
- NUREGとNUCIAでもおよそ100倍の差
- 個々の機器故障率が事故発生リスクに直結

以降の解析ではNUREGデータを使用

多重性／炉心損傷頻度変化

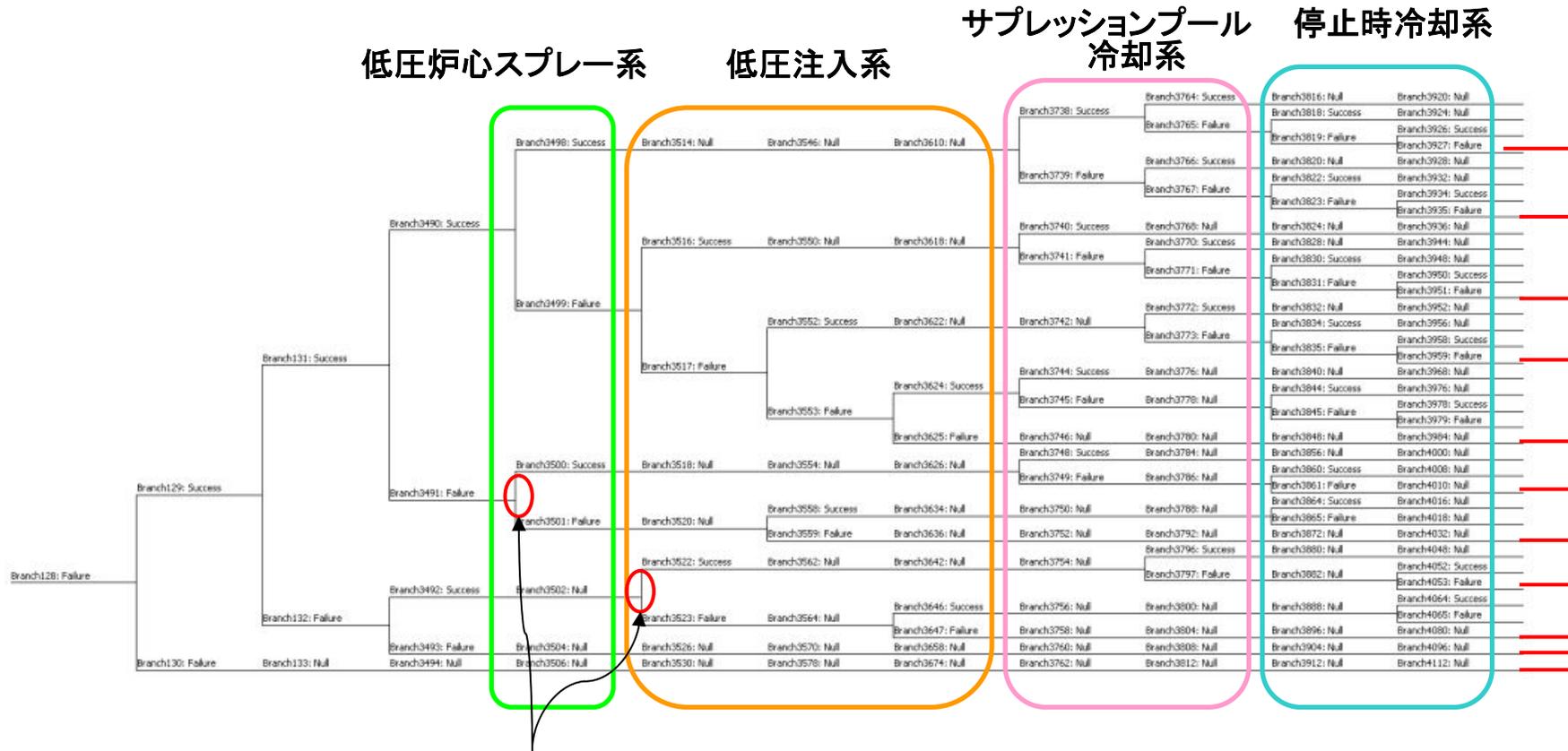
- 低圧炉心スプレー系(1系統)
- 低圧注入系(独立系1系統、共有系2系統)
- サプレッションプール冷却系(共有系2系統)
- 停止時冷却系(共有系2系統)



多重性を変化させ、炉心損傷頻度の変化を観測

共有系の多重性は一括で増減させる

多重性／炉心損傷頻度変化



1. 分岐に各系統の信頼度／非信頼度の値を代入

2. 炉心損傷事故に至るシーケンスの頻度の総和をとる

多重性／炉心損傷頻度変化

□ 解析結果

	0系統	1系統	2系統	3系統	4系統
低圧炉心スプレー系	2.60E-04	2.60E-04	2.60E-04		
低圧注入系（独立系）	2.60E-04	2.60E-04	2.60E-04		
〃（共有系）	1.30E-01	5.81E-03	2.60E-04	2.41E-04	2.24E-04

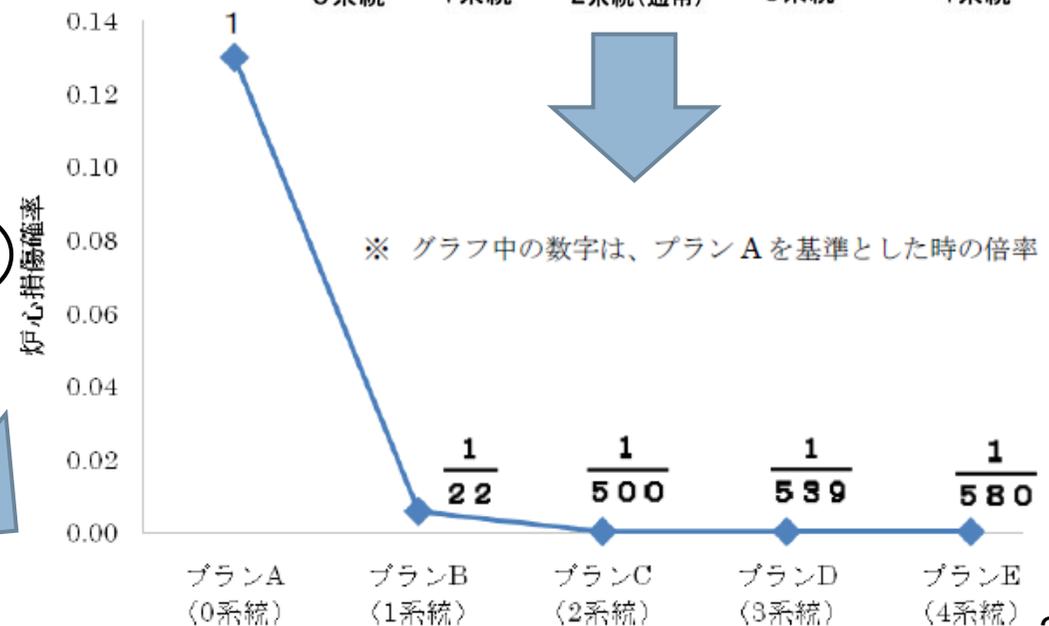
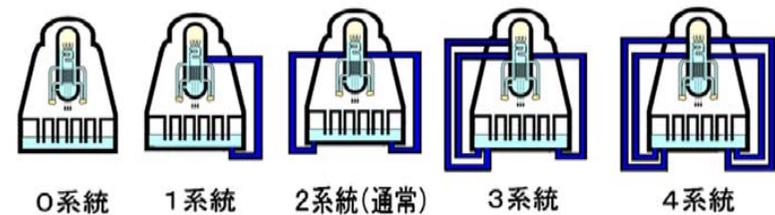
- 低圧炉心スプレー系、低圧注入系（独立）多重化
 - 炉心損傷頻度への影響：小さい
- 低圧注入、サプレッションプール冷却、停止時冷却系の多重化
 - 炉心損傷頻度への影響：大きい
- 一定数以上の多重化に対しては炉心損傷頻度の変化が極めて小さくなる
 - 多重化による系統自体の故障確率が系統数に対して指数的に増減するため

アンケート調査

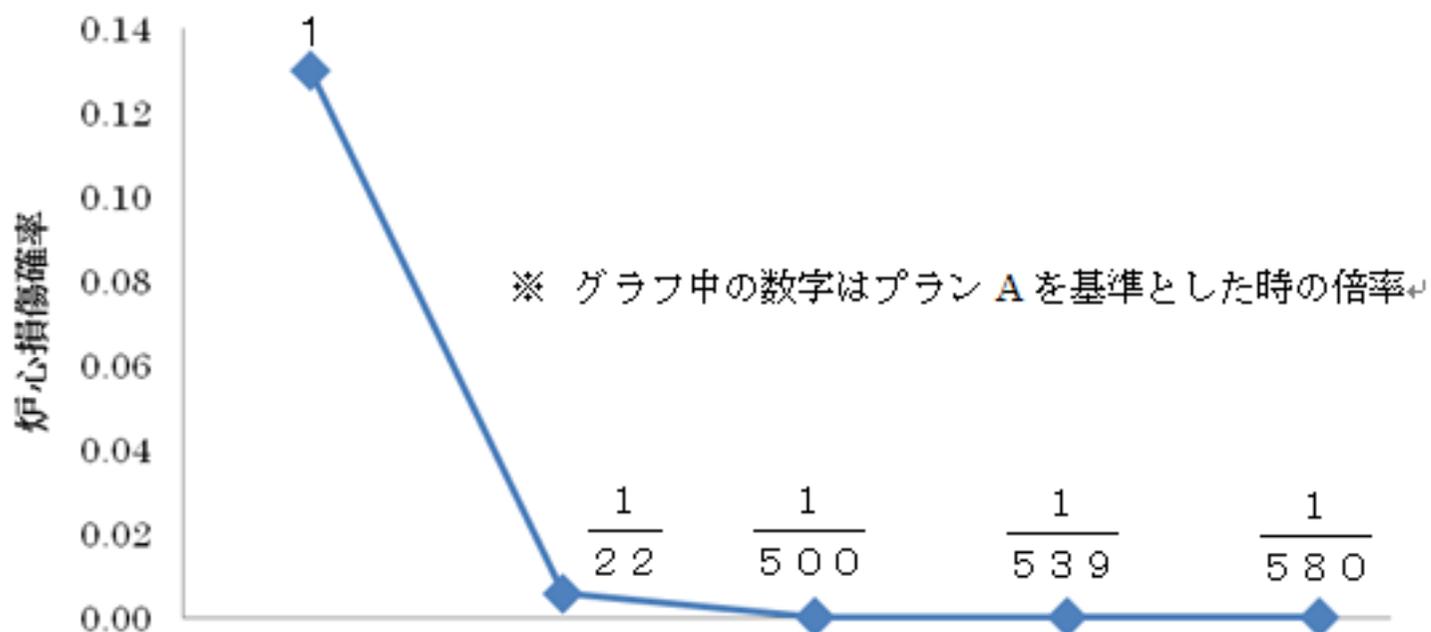
アンケートの概要

- 前提：回答者の居住地に原子力発電所が建設される。
- 安全対策を0～4系統の5種類の建設プランから選択。
- プラン選択時の指標として、以下を順に提示。

- 1)炉心損傷頻度(問7)
- 2)事故時の被害額期待値+1)(問8)
- 3)対策コスト+1),2)(問9)
- 4)個人負担+1),2)(問10)
- 5)値下げ金額+1),2)(問11)

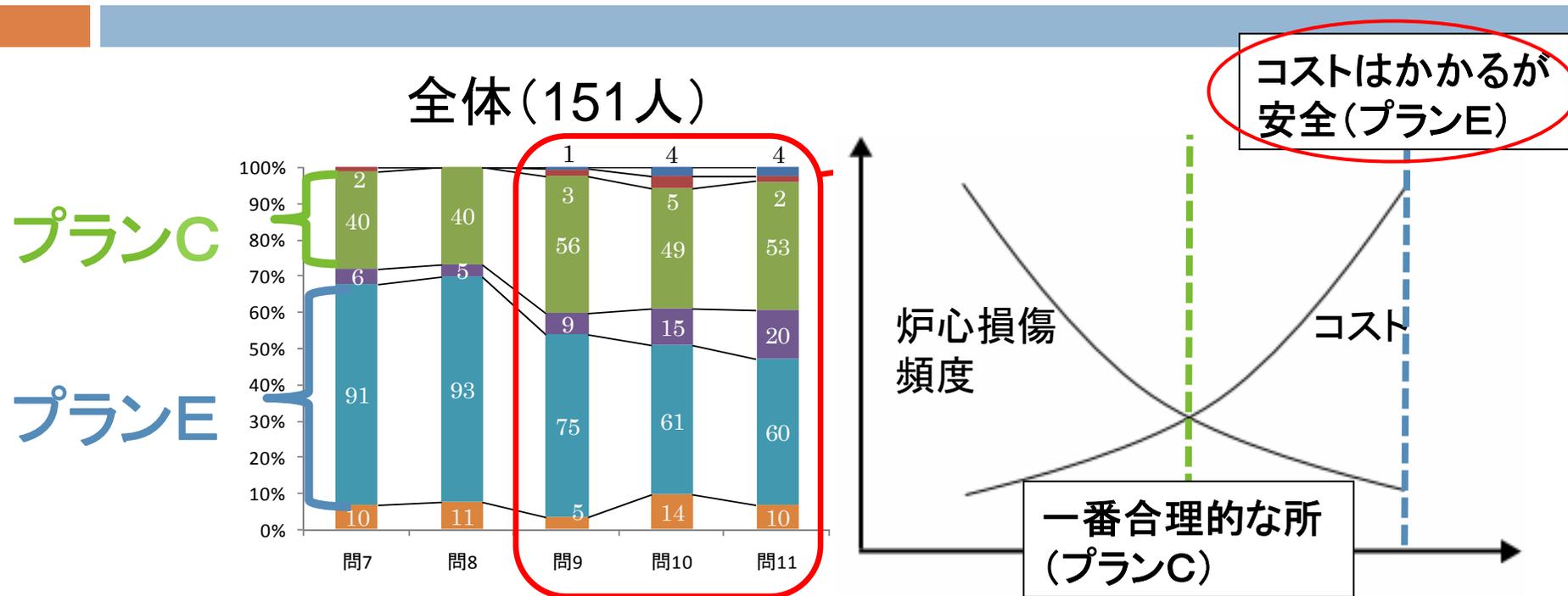


アンケート例

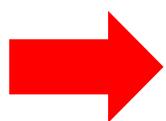


	プランA (0系統)	プランB (1系統)	プランC (2系統)	プランD (3系統)	プランE (4系統)
被害額 (円)	3900 億	174 億 3 千万	7 億 8 千万	7 億 2 千万	6 億 7 千万
安全対策コスト (円)	0	20 億	40 億	60 億	80 億

集計結果の全体傾向

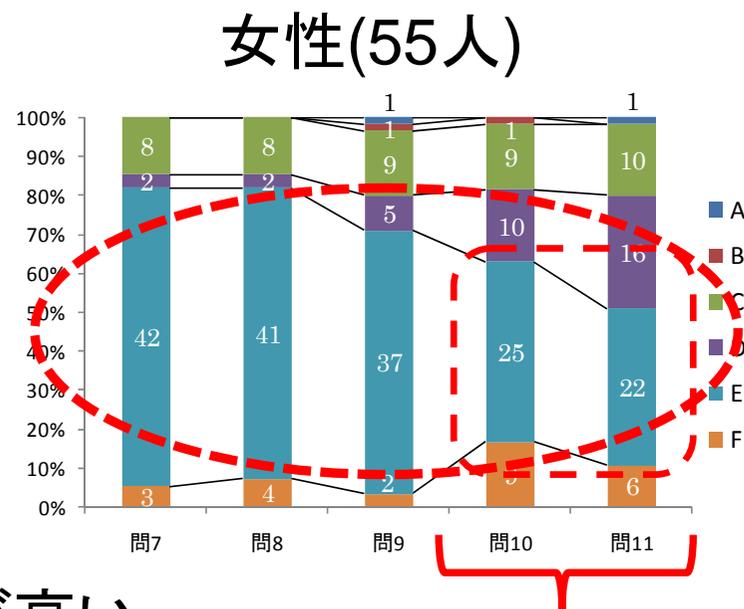
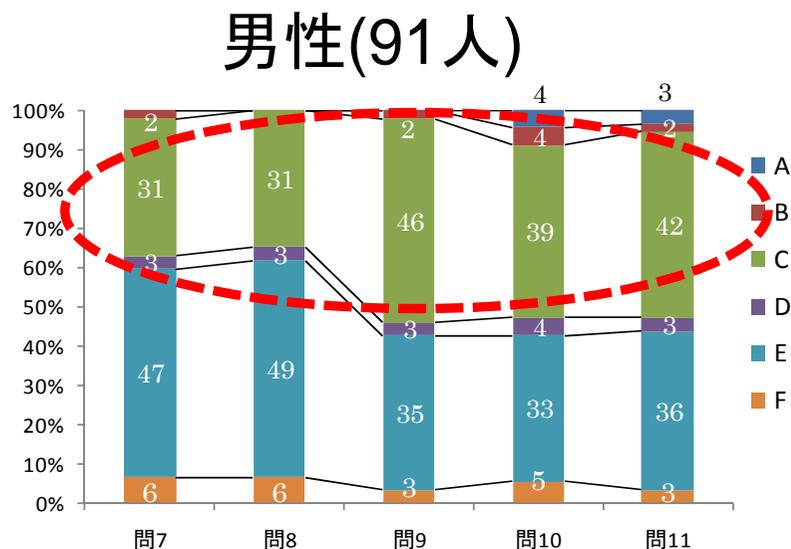


- 全体としてC、Eを選択する人が多数を占めている
⇒確率変化に注目するグループと安全性を優先するグループに分かれる
- 問7、8と問9以降においてプラン選択の傾向に違いが見られる
⇒経済的指標を付け加えることによる意識の変化



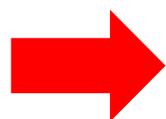
安全性を最優先して選択する人と炉心損傷頻度や経済的指標を考慮し選択する人に分かれる

クロス集計(性別)



- 男性は女性よりもCを選ぶ割合が高い
 - 理由:コストは一定で増加するのに対し炉心損傷頻
- 女性はより安全なプランを選ぶ割合が高い
 - 問10, 11では他の問いに比べてEを選択する人が減少
 - 理由:費用や値下げ金額と安全性の兼ね合いを考慮

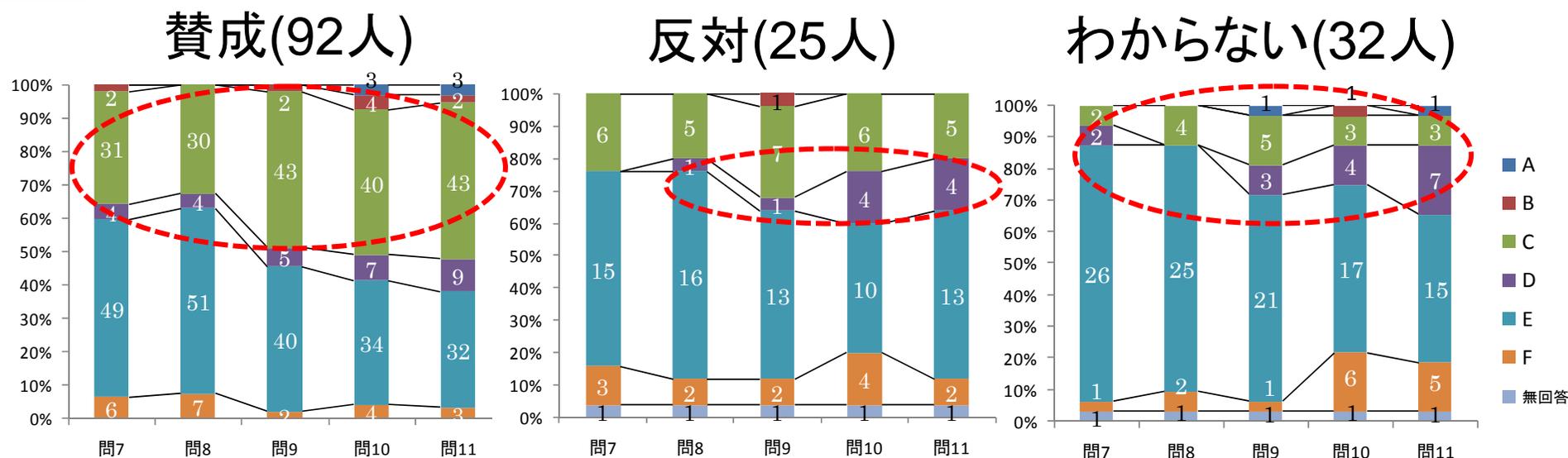
個人に直接影響する経済指標を追加



男性:費用対効果を意識した判断をする傾向

女性:より現実に近い事柄を意識して判断する傾向

クロス集計(原子力発電の推進に対する態度)



⇒全体的にEからA~Cへ変化する

「賛成」はEからCへの変化が多く、変動幅も大きい

「反対」はEからDへの変化が多く、変動幅が小さい

「わからない」は変動幅が最も大きい



原子力発電の推進に対する態度の差が、安全対策に対する意識に影響している。

アンケート結果の考察

- 原子力発電所の安全対策については、「費用対効果を重要視するグループ」だけでなく、「安全性を優先する人」も多くみられた。
(原子力発電所の特徴)
- PSA結果だけでも一定の効果があったが、さらに追加情報を与えることで安全対策に関する意識が変化する。特に、コスト情報を与えた場合、合理的な判断を下す傾向がある。
- 対象者の属性により、安全対策に関する意識を変化させる情報と変化率の大きさが異なる傾向にある。

属性		情報	変動幅
性別	男性	コスト情報	小さい
	女性	個人負担情報	大きい
態度	賛成	コスト情報	大きい
	反対	コスト情報	小さい

まとめ, 今後の課題・展望

まとめ

- 全国の原子力発電所におけるトラブル情報を収集・整理し、トラブルの傾向を把握
- PSAを用いて、対象系統の多重性を変化させた場合の炉心損傷頻度への影響を評価
 - 多重性を無くした場合、炉心損傷頻度が大きく増加
 - 多重化を行った場合、一定の値よりほぼ変化が見られない
- PSA結果を用いて、原子力発電所の安全対策に対する社会意識を調査
 - PSA結果のみの提示でも一定の効果があるが、追加情報の提示はより効果的(コスト情報)
 - 意識の変化を促す情報とその変動は、属性(男性/女性, 原子力発電の促進に賛成/反対)により異なる

今後の課題・展望

- 被害額の期待値, 個人負担額に使用したデータ, 前提の精査
- 属性の偏らない集団でのアンケート調査実施

- 現在の稼働実績を踏まえた機器故障率データの使用
- 系統間の相互関係(共通要因故障等)を考慮したPSAの実施
- 放射性物質の漏えいパターンを評価したレベル2, 3PSA結果の活用

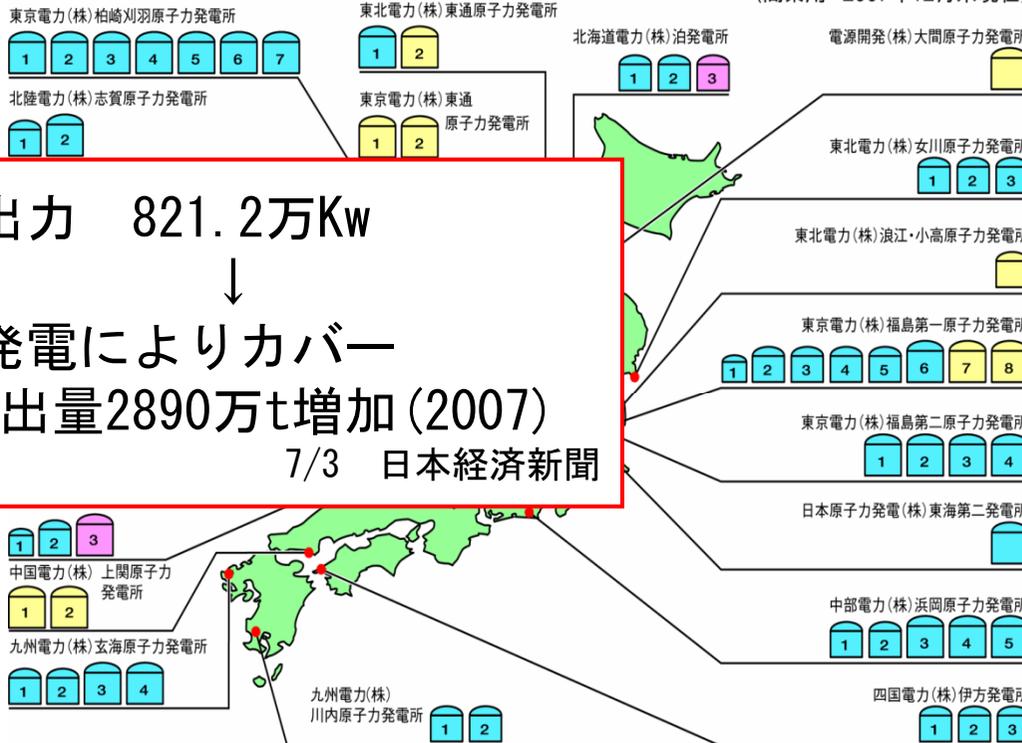


以下参考スライド

現在の原子力発電所稼働状況

日本の原子力発電所の運転・建設状況

(商用・2007年12月末現在)



合計出力 821.2万Kw

↓
火力発電によりカバー
CO₂排出量2890万t増加(2007)

7/3 日本経済新聞



	基数	合計出力(万kW)
運転中	55	4,946.7
建設中	2	228.5
着工準備中	11	1,494.5
合計	68	6,669.7

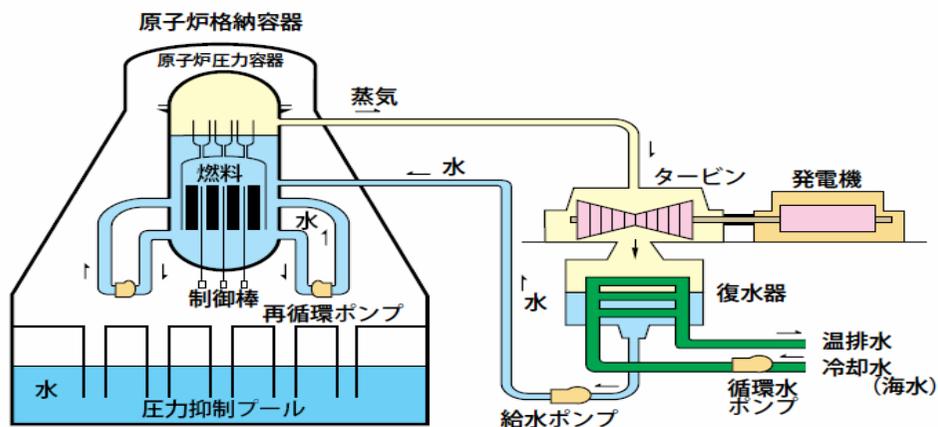
国内における
商用原子炉
55基

BWR : 32基
東京・東北
北陸・中部・中国
各電力会社

PWR : 23基
北海道・関西
四国・九州
各電力会社

発電方式

➤ BWR (Boiling Water Reactor) 沸騰水型

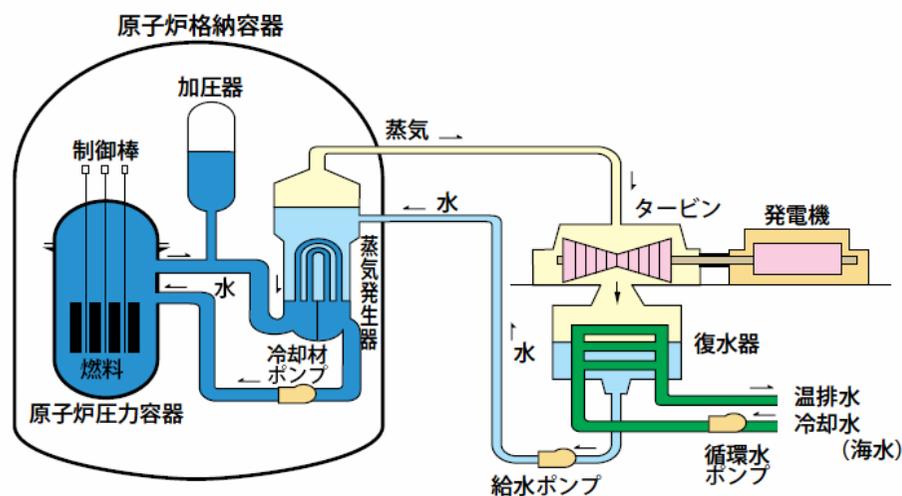


出典：資源エネルギー庁「原子力2005」

1次系2次系の区別はない。

燃料からエネルギーを受けた冷却水が沸騰して蒸気となりタービンをまわす。

➤ PWR (Pressurized Water Reactor) 加圧水型



出典：資源エネルギー庁「原子力2005」

1次系と2次系がある。
1次系冷却水は直接燃料に触れエネルギーを受け、2次系は熱交換機を介して1次系の熱により蒸発しタービンをまわす。2次系は直接燃料には触れない。

国際原子力事象評価尺度（INES）

⇒ 原子力発電所等で発生した事故・故障等の影響度合を簡明かつ客観的に示す尺度

	レベル	基準（最も高いレベルが当該事象の評価結果となる）			参考事例 (INESの公式評価でないものが含まれている)
		基準1：所外への影響	基準2：所内への影響	基準3：深層防護の劣化	
事故	7 (深刻な事故)	放射性物質の重大な外部放出 〔ヨウ素131等価で数万テラベクレル相当以上の放射性物質の外部放出〕			チェルノブイリ事故 (1986年)
	6 (大事故)	放射性物質のかなりの外部放出 〔ヨウ素131等価で数千から数万テラベクレル相当の放射性物質の外部放出〕			
	5 (所外へのリスクを伴う事故)	放射性物質の限られた外部放出 〔ヨウ素131等価で数百から数千テラベクレル相当の放射性物質の外部放出〕	原子炉の炉心の重大な損傷		スリーマイルアイランド事故 (1979年)
	4 (所外への大きなリスクを伴わない事故)	放射性物質の少量の外部放出 〔公衆の個人の数ミリシーベルト程度の被ばく〕	原子炉の炉心のかなりの損傷／ 従業員の致死量被ばく		
異常な事象	3 (重大な異常事象)	放射性物質の極めて少量の外部放出 〔公衆の個人の十分の数ミリシーベルト程度の被ばく〕	所内の重大な放射性物質による汚染／急性の放射線障害を生じる従業員の被ばく	深層防護の喪失	
	2 (異常事象)		所内のかなりの放射性物質による汚染／法定の年間線量限度を超える従業員の被ばく	深層防護のかなりの劣化	美浜発電所2号機蒸気発生器伝熱管損傷 (1991年)
	1 (逸脱)			運転制限範囲からの逸脱	もんじゅナトリウム漏えい (1995年)
尺度以下	0 (尺度以下)	安全上重要ではない事象		0+ 安全に影響を与え得る事象 0- 安全に影響を与えない事象	
評価対象外		安全に関係しない事象			

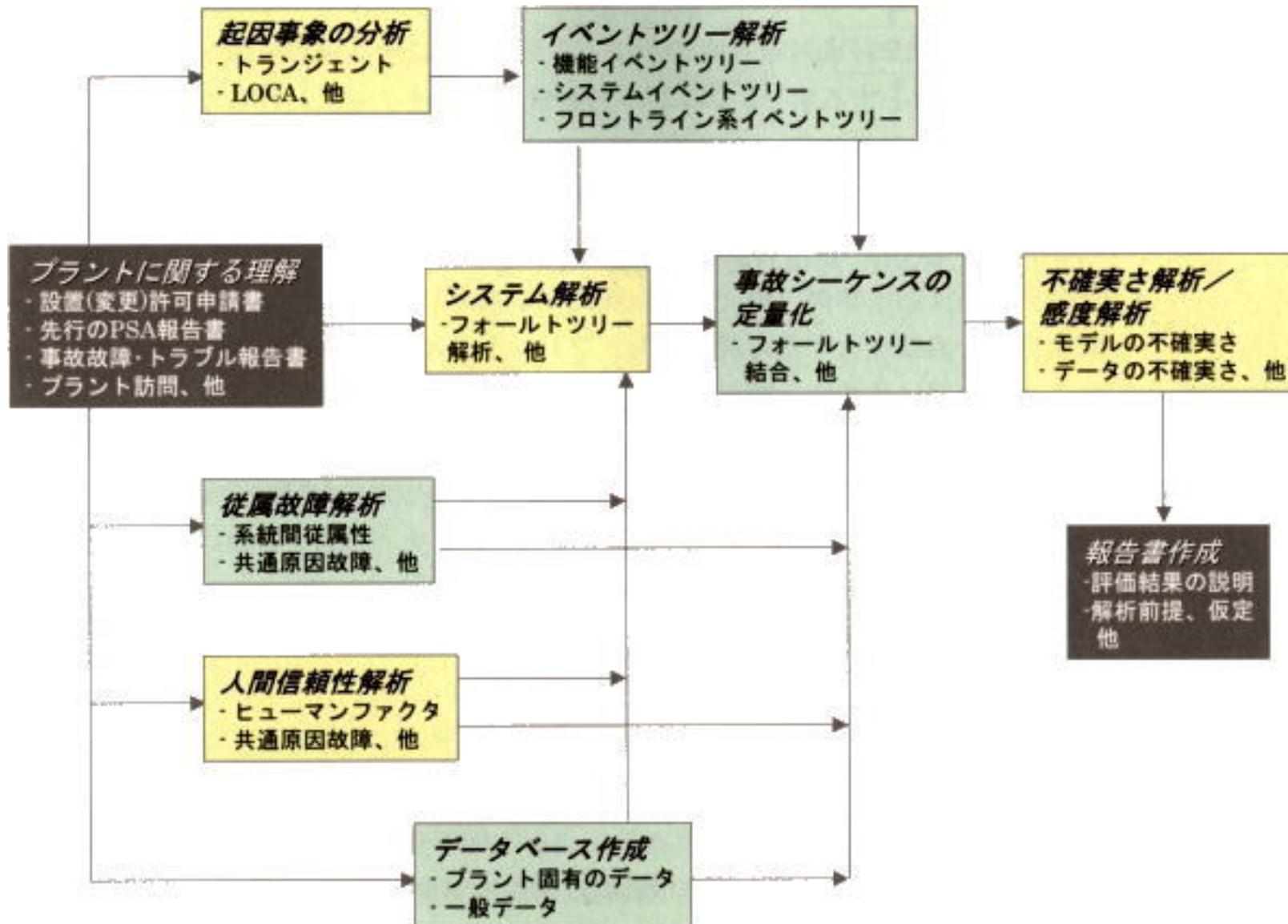
シーベルト(Sv)は、放射線が人体に与える影響を表わす単位。(ミリは1,000分の1)
ベクレル(Bq)は、放射性物質の量を表わす単位。(テラは10¹²=1兆)

出典：資源エネルギー庁「原子力2003」

国外におけるPSA活用例

	活用状況
ベルギー	<ul style="list-style-type: none">➤ 定期安全レビュー➤ 運転経験事象の評価➤ 運転員訓練計画➤ プラント管理
フランス	<ul style="list-style-type: none">➤ 定期安全レビュー➤ 運転経験事象の評価➤ 設計変更➤ 将来炉 (ERP) の設計
アメリカ	<ul style="list-style-type: none">➤ 検査活動の優先順位付け➤ 運転経験分析及び前兆事象研究➤ 新炉設計の解析

レベル1 PSAの詳細図



故障率・信頼度

➤ 故障率 $\lambda =$ **故障件数 / 運用時間**

ポンプ用回路の故障率

霞ヶ浦揚水場ポンプ操作回路の故障率

1.27E-08 [1/Hr]

原子力発電所における補助継電器（リレー）の故障率

1.8E-10 [1/Hr]

➤ 信頼度 $R(t) = \exp(-\lambda t)$

➤ 不信頼度 $F(t) = 1 - R(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$

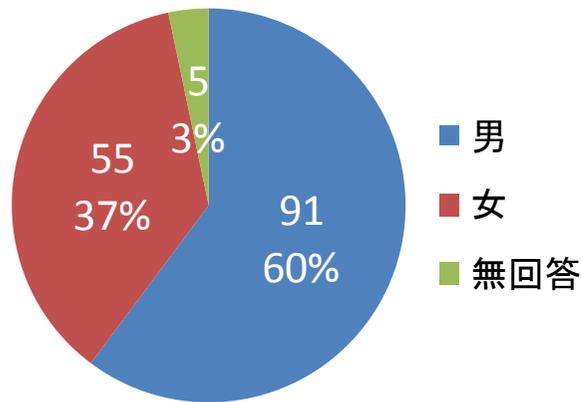
アンケート項目要旨

問1	原子力発電推進に対する賛否
問2	原子力発電の仕組みに関する知識
問3	PSAに関する知識
問4	原子力発電所の安全対策に対する満足度
問5	安全装置が0系統の時受ける印象(確率表示なし)
問6	安全装置が4系統の時受ける印象(確率表示なし)
問7	PSA(炉心損傷頻度)
問8	PSA＋被害額(円) A：3900億，B：174.3億，C：7.8億，D：7.2億，E：6.7億 (原発事故時の被害額に各プランの炉心損傷頻度を乗じ期待値としてプランごとの被害額とした) *既往研究を基に3兆円と設定
問9	PSA＋被害額＋安全対策コスト(円) A：0，B：20億，C：40億，D：60億，E：80億 (1系統あたり20億円として各プランごとの安全対策コストとした)
問10	PSA＋被害額＋各家庭の負担額(円) A：0，B：1,325，C：2,650，D：3,975，E：5,300 (日本全国の原発55基に対し安全装置を設ける際の費用を各家庭で負担すると仮定した)
問11	PSA＋被害額＋電気料金値下げ(円) A：7,083，B：5,417，C：3,750，D：2,083，E：416 (一年間にわたり電気料金が値下げされると仮定*し，さらに選択したプランにより値下げ額を決定。)* 交付金を電気料金の割引に充てると仮定 Cプラン：交付金45億円(10年で450億) ⇒ 1家庭 4万5千円/年

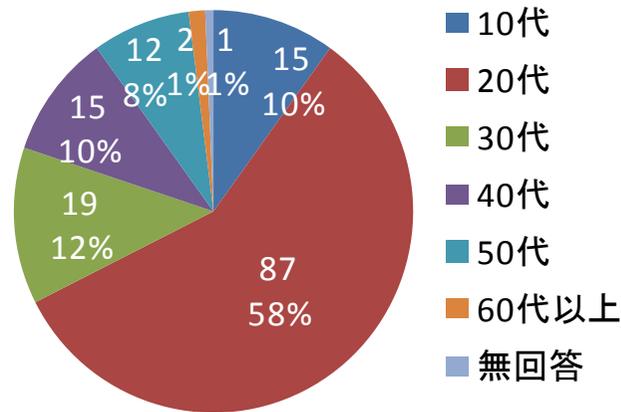
回答者の属性

回答者の属性(総数:151人)

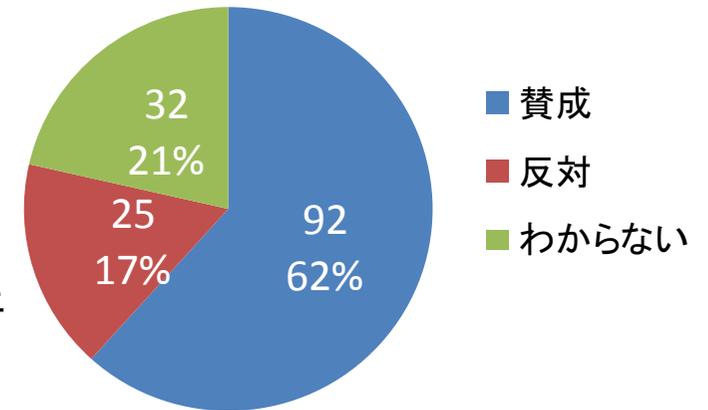
性別



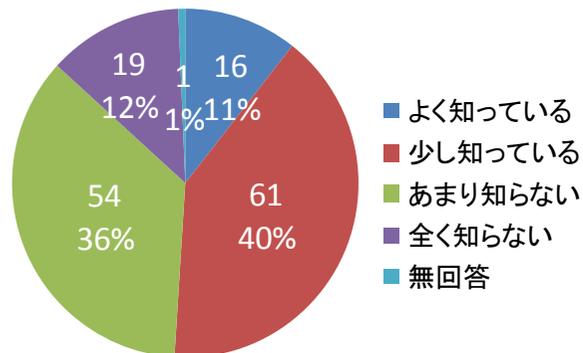
年齢



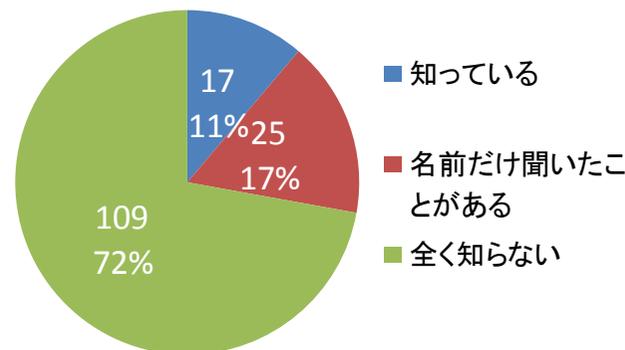
原子力発電の推進に対する態度



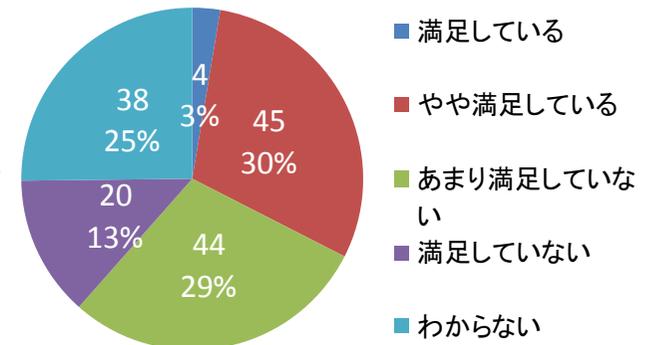
原子力発電の仕組み



PSAについて



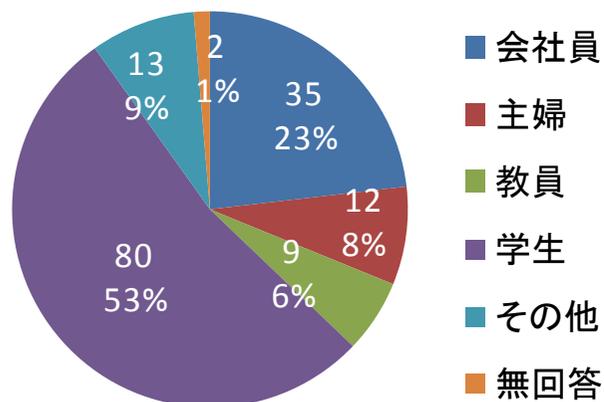
現状の安全対策



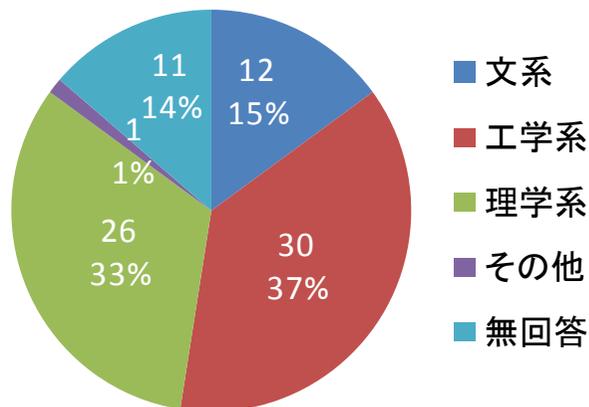
アンケートの補足

□ 回答者の属性(151人)

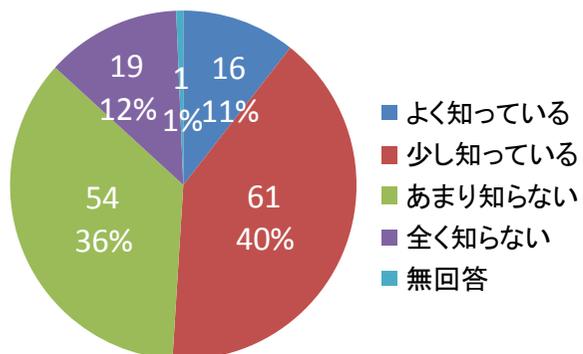
職業



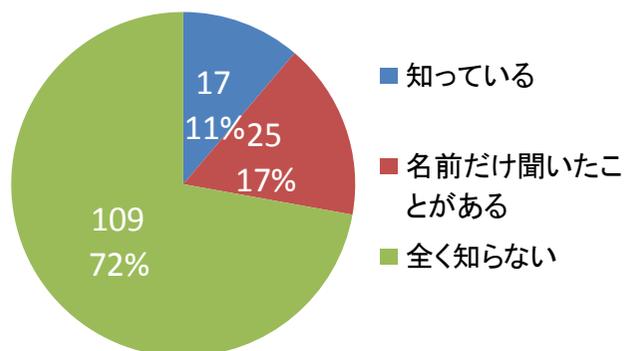
学生の所属



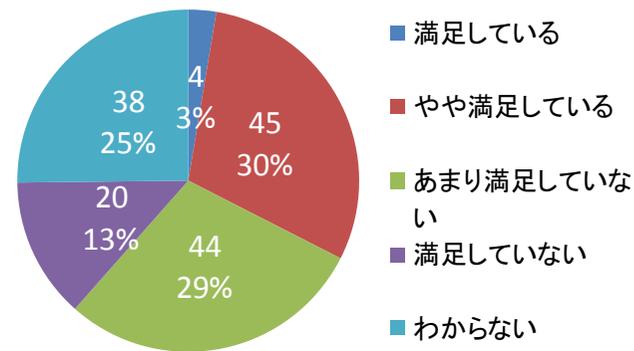
原子力発電の仕組み



PSAについて

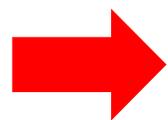
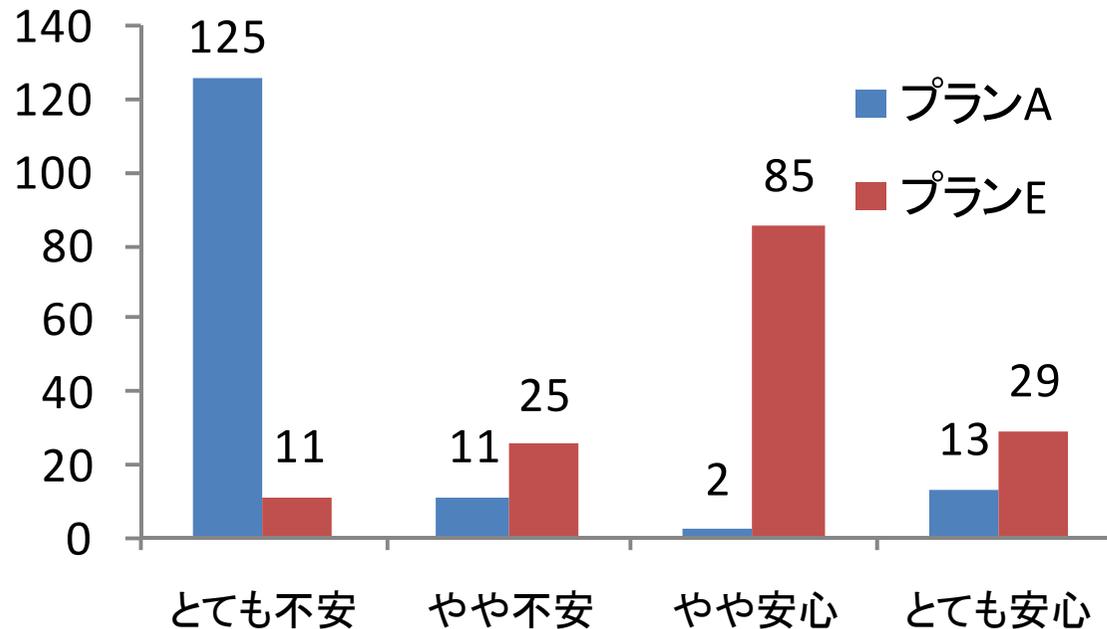


現状の安全対策



アンケートの補足

□ 安全対策の変化に伴う社会意識の変化



システムを0システムにすること(プランA)に対しては、多くの方が強い不安感を感じる。

システムを4システムにすること(プランE)に対しては、感じ方にばらつきが生じる。