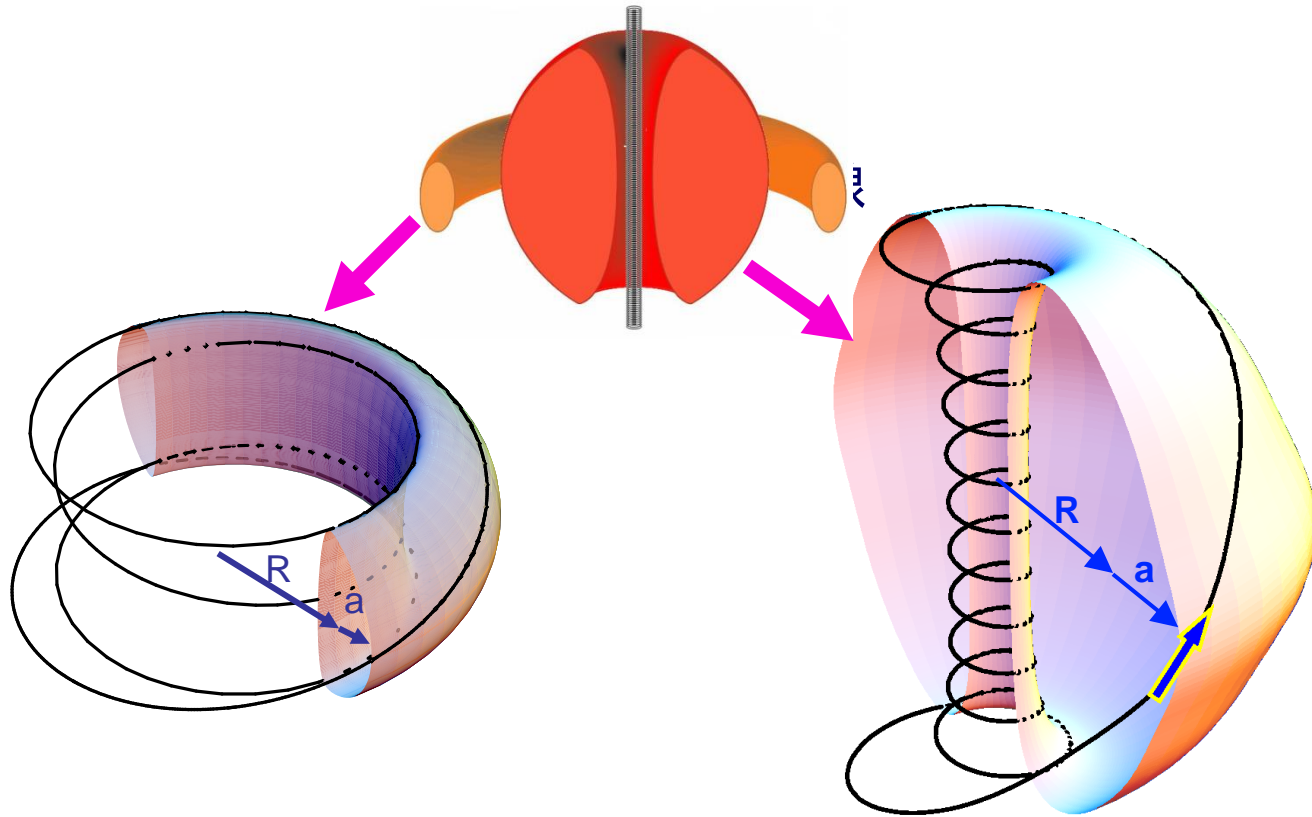


通常トカマクと球状トカマクの比較



通常
の
トカマク
(Tokamak)

$$R/a = 3\sim 7$$

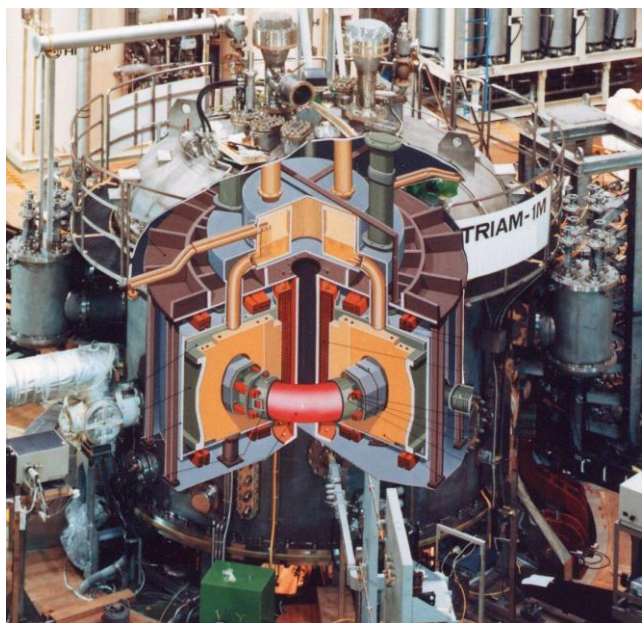
球状
トカマク
(Spherical Tokamak : ST)

$$R/a = 1\sim 2$$

九州大学 応用力学研究所における
(高温プラズマカ学研究センター)
核融合プラズマ研究

九州大学におけるトカマクプラズマ研究

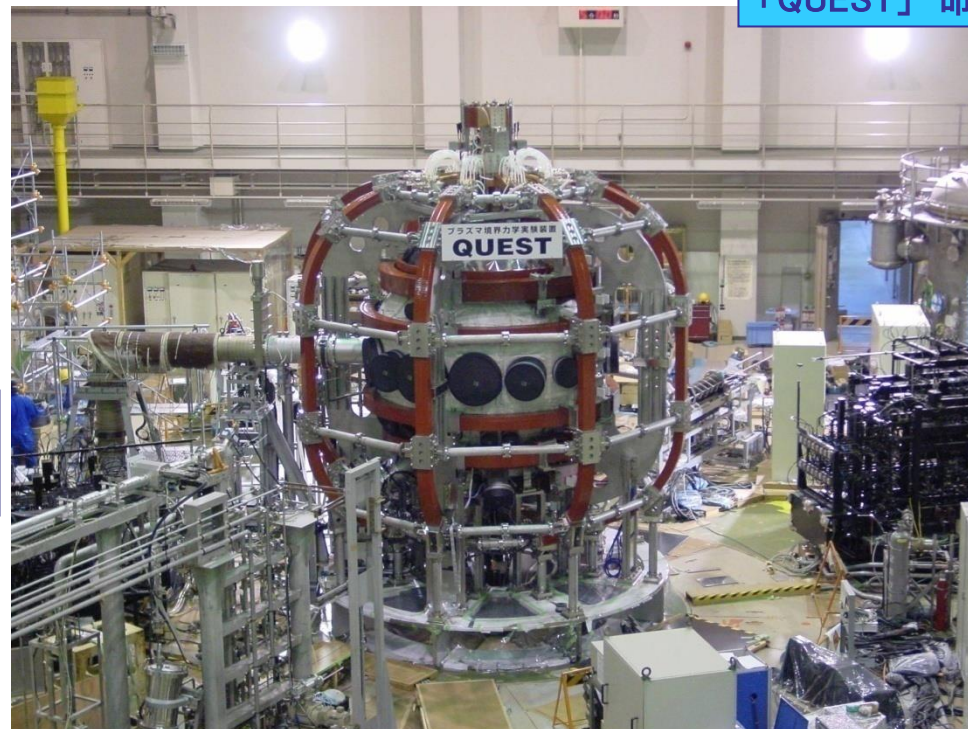
超伝導トカマク TRIAM-1M



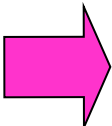
Nb_3Sn による世界初の
超伝導装置

超伝導トカマク:長時間電流駆
動実験 5h 16m(世界記録)

球状トカマク QUEST



「QUEST」命名



2004
~
2005

球状トカマク(高圧カプラズマ)の
長時間維持

プラズマとは...? そして集団的性質

―― いろいろなプラズマ

* 太陽・宇宙プラズマ、身近なプラズマ、プラズマの応用

(1) プラズマとは...?

- ・ 固体、液体、気体 ---- そして プラズマ
⇒ 「物質の第4の状態」、プラズマの定義

(2) プラズマの集団的性質 - 1

- ・ 多粒子による遮蔽効果(デバイ遮蔽) ―― デバイ長

(3) 同上 - 2

- ・ プラズマ振動と電磁波(電波、光)の伝搬・反射 ―― 身近な応用

(4) 同上 - 3

- ・ 電界磁界中の荷電粒子とプラズマ ―― 運動方程式と応用
⇒ 単純トラス・ミラー磁界中のプラズマの性質
⇒ 地球磁界中プラズマの振舞いとオーロラ

[3] おわりに —— 日本の科学技術と将来

(1) 3.11事故の分析と反省・教訓

- ・ 科学技術への自信(回復)
- ・ 安全と技術 (3.11事故の分析と反省)
- ・ 桁数の重要性、徹底法の一つの考え

(2) 理学と工学 ——— 両輪の大切さ

- ・ 理学と工学の違い
- ・ 両輪の大切さ、「ICPP」主催の知見
- ・ 科学技術立国(?)の将来

(3) 最近の日本の科学技術 —— 明確な低落傾向

- ・ 最近の状況 —— 科学技術軽視 / 理系軽視、
科学技術研究費、論文数、大学院生数、etc

福島第1原子力発電所事故の分析と教訓

なお、提言としては、「1年程度の短期に行うべき対策の例」と、「2、3年程度の中期にじっくり改革すべき対策の例」にまとめた。

1. 地震
2. 津波
3. 全電源喪失
4. 全冷却系喪失
5. アクシデントマネジメント
6. 水素爆発
7. 使用済み燃料貯蔵プール
8. 安全研究
9. 安全規制と安全設計
10. 組織・危機管理
11. 情報公開
12. 緊急時安全管理

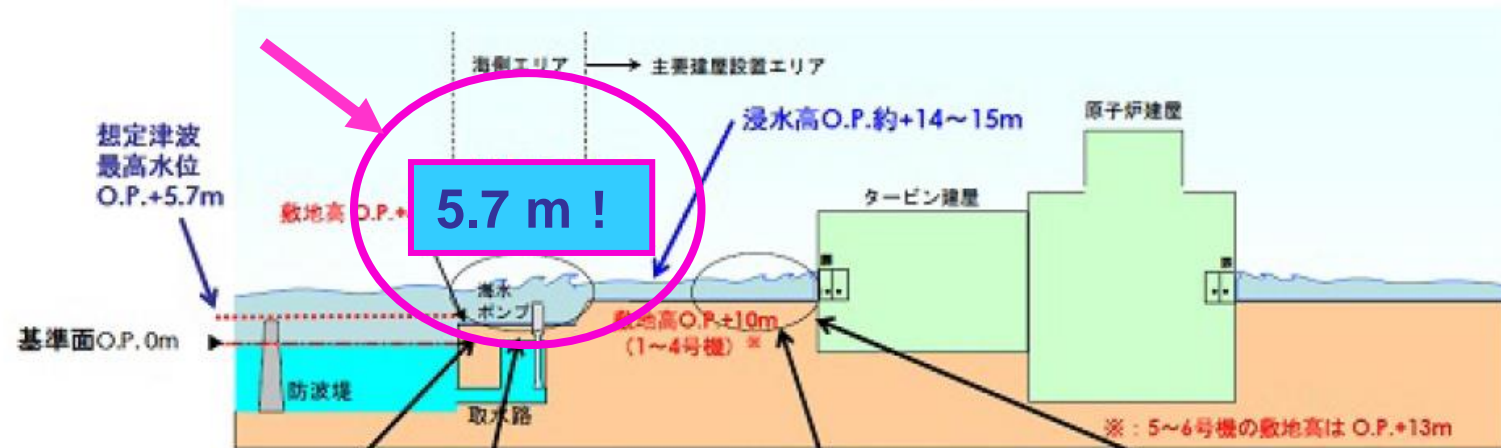
1. 地震の揺れに対する教訓

- a. 地震の揺れに対する従来の対策は、おおむね有効であった可能性が高いと推定される
- b. 外部電源系の地震対策が十分でなく、事故の拡大を防げなかった

2. 津波に対する教訓

- a. 耐震設計で考慮していた津波の規模が不十分であった
- b. 海水の浸水により、安全上重要な機器が停止し、事故の拡大を防げなかった
- c. 地下構造物の浸水防止が不十分であり復旧作業を妨げている

福島第一発電所の津波



<http://www.meti.go.jp/press/2011/04/20110413006/20110413006.pdf>

海水ポンプが浸水し停止



全冷却系喪失

タービン建屋の非常用
ディーゼル発電機が浸水し停止



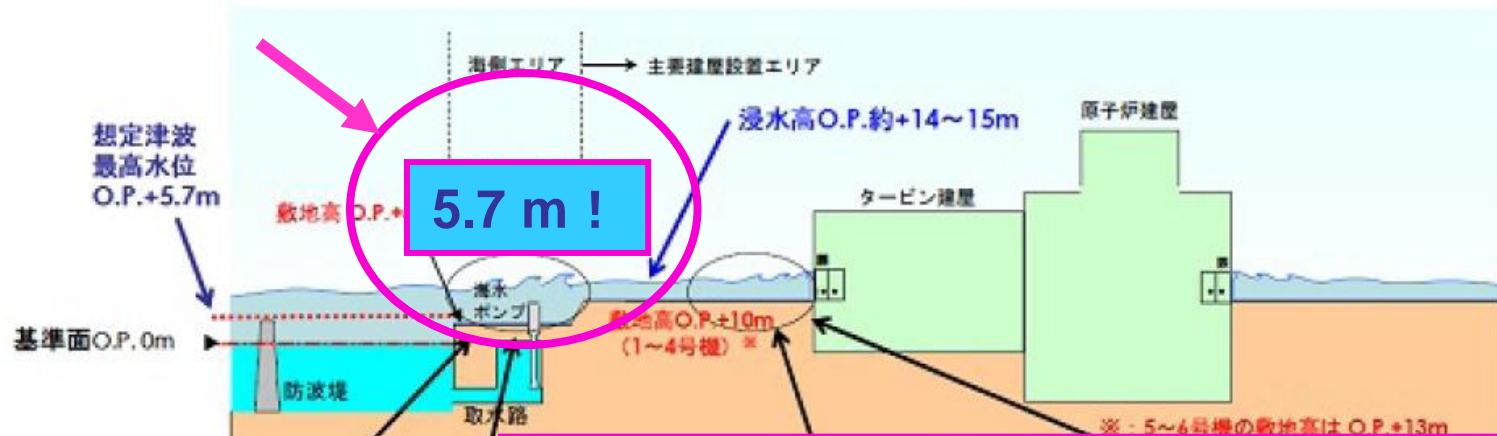
全交流電源喪失



ポンプ、
計器、
弁など
停止

バッテリーは約8時間しかもたない

福島第一発電所の津波



<http://www.meti.go.jp/press/2011/04/20110413006/20110413006.pdf>

なぜ？
設計時の経済性尊重？

海水ポンプが浸水し停止



全冷却系喪失

タービン建屋の非常用
ディーゼル発電機が浸水し停止



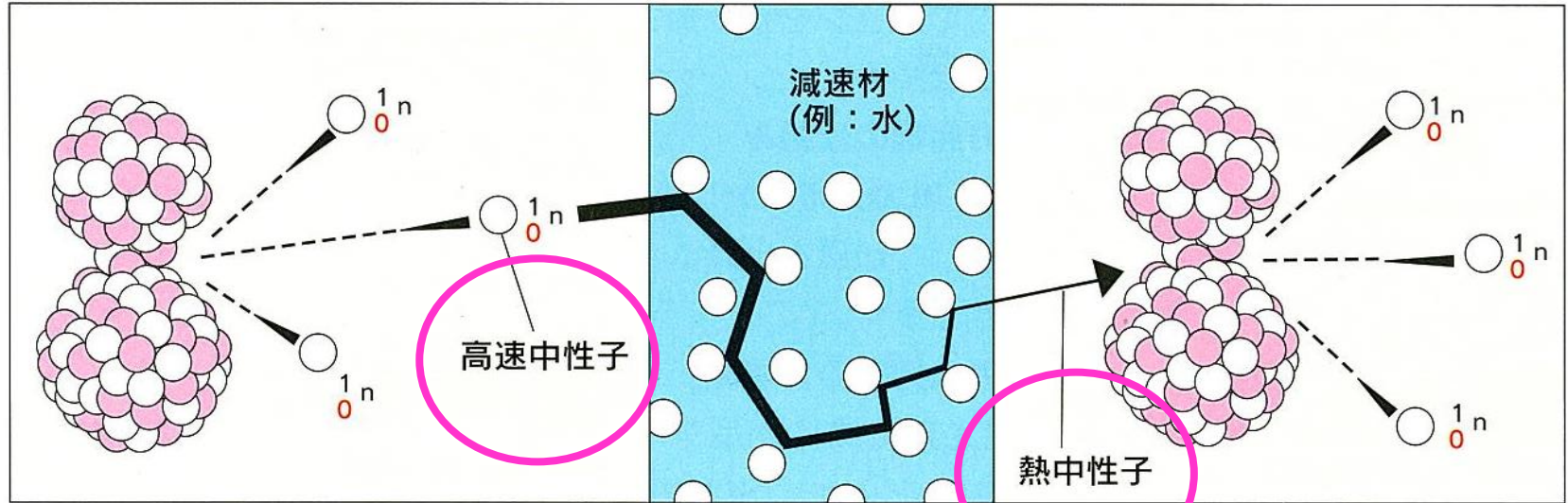
全交流電源喪失



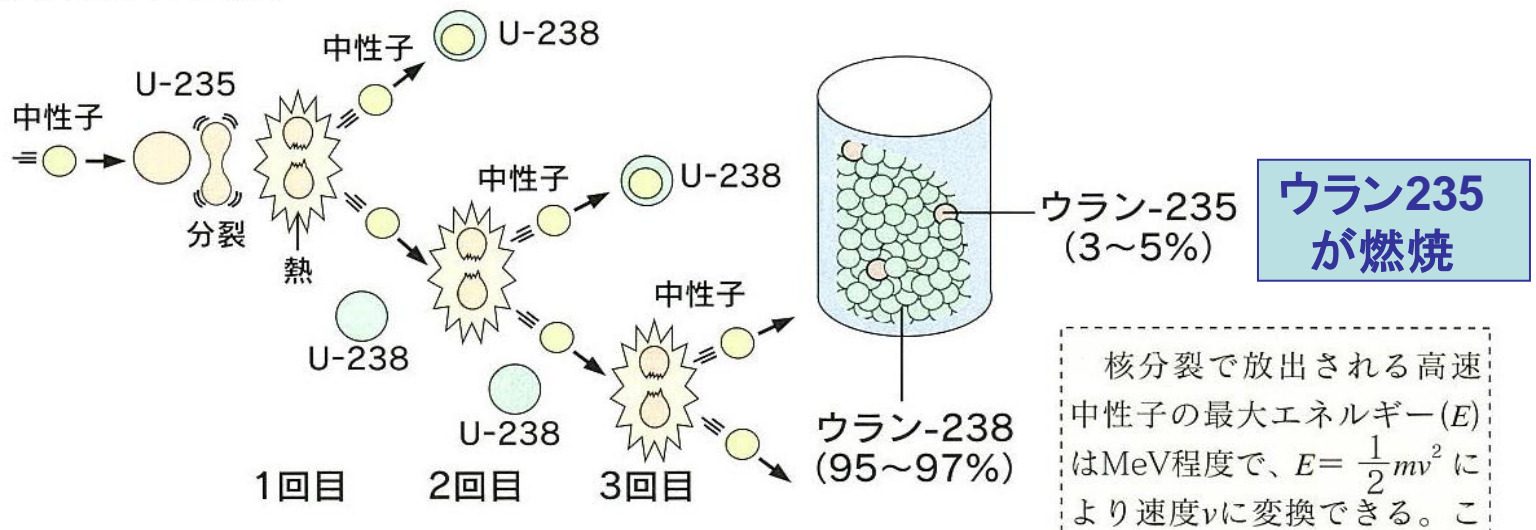
ポンプ、
計器、
弁など
停止

バッテリーは約8時間しかもたない

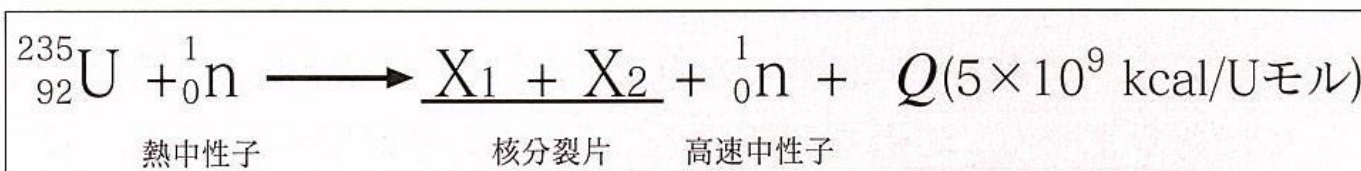
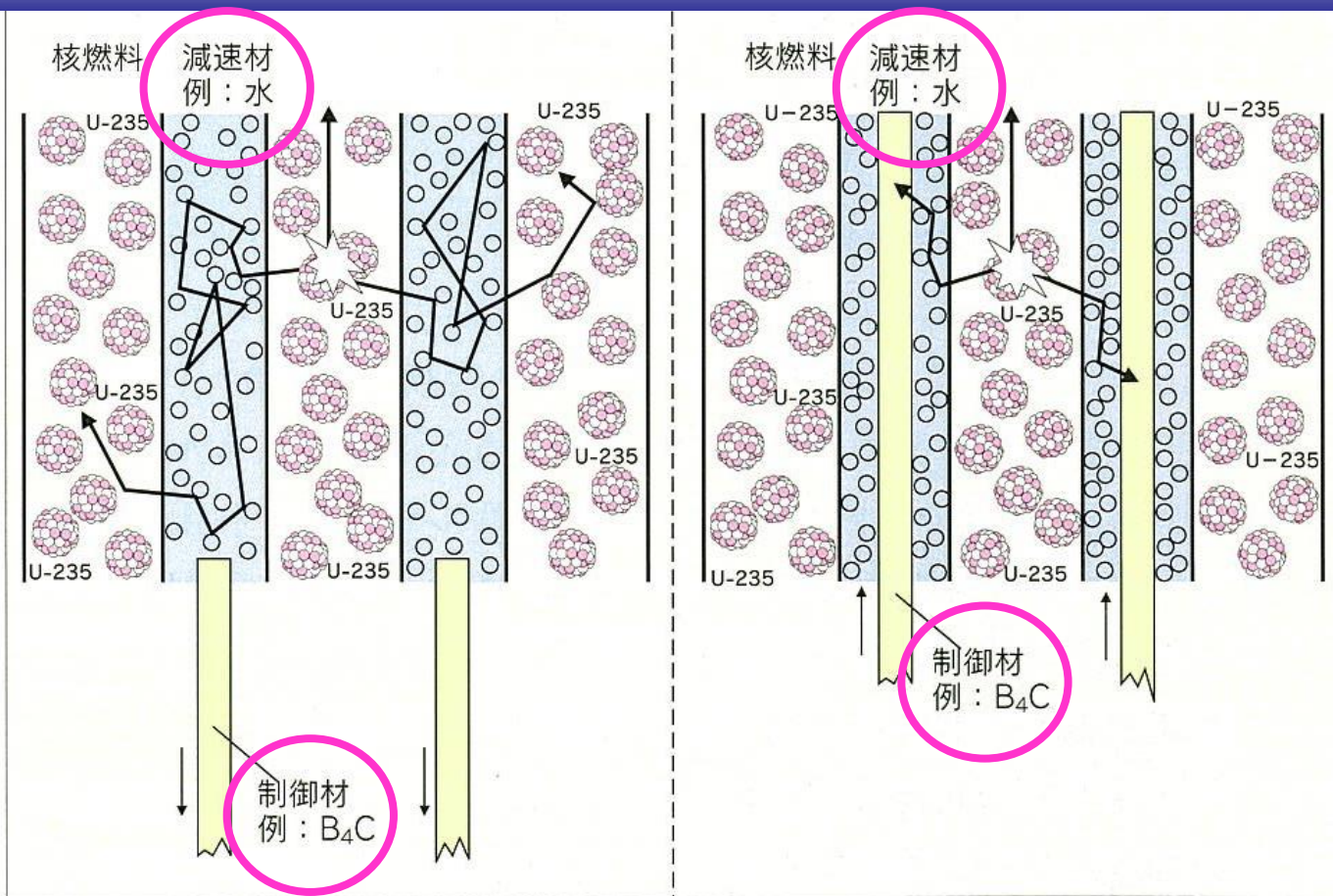
原子力発電の連鎖反応



●原子力発電の場合

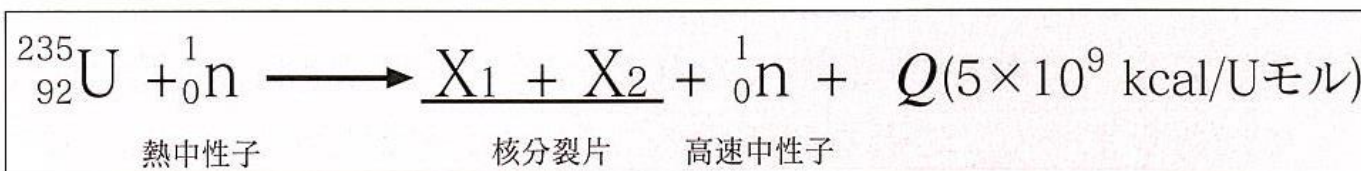
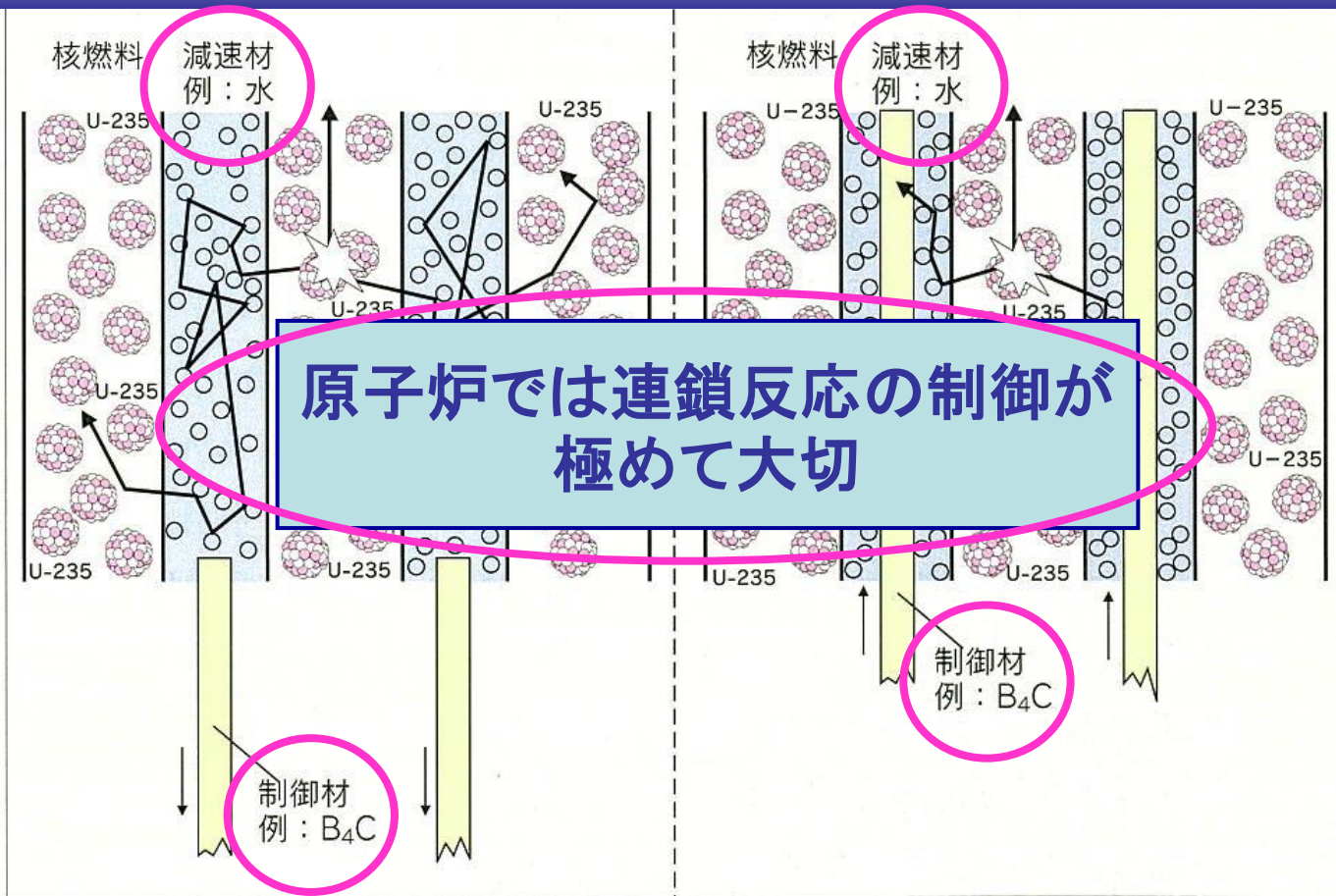


原子力発電での核分裂反応の促進(燃焼)と停止



(1 電子ボルト = 11600 K)

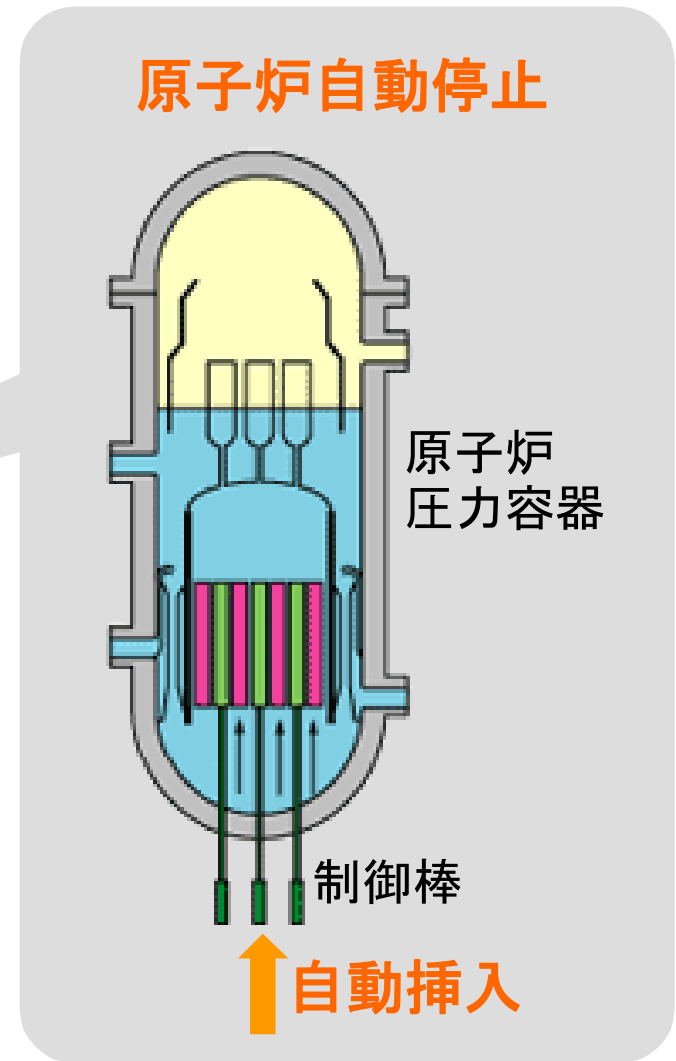
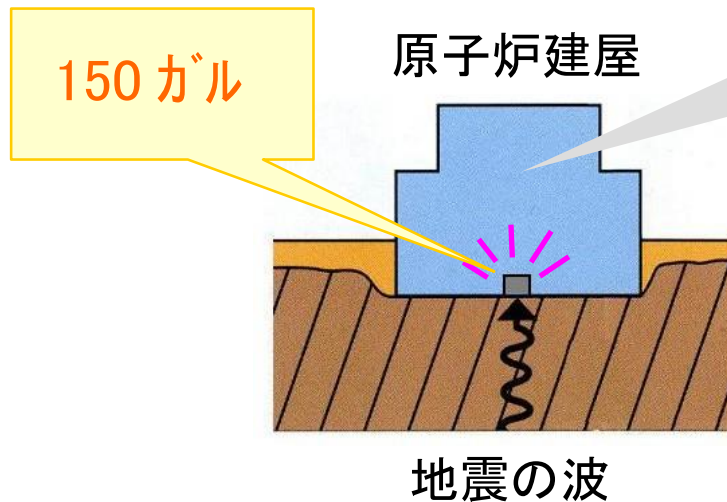
原子力発電での核分裂反応の促進(燃焼)と停止



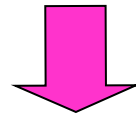
(1 電子ボルト = 11600 K)

地震時には原子炉を自動停止

原子炉建屋地下2階で150ガル（震度5強程度）の揺れを感知すると、直ちに全制御棒が自動で挿入され、原子炉を自動停止するしくみになっています。



しかし、もう1つ大切なこと！



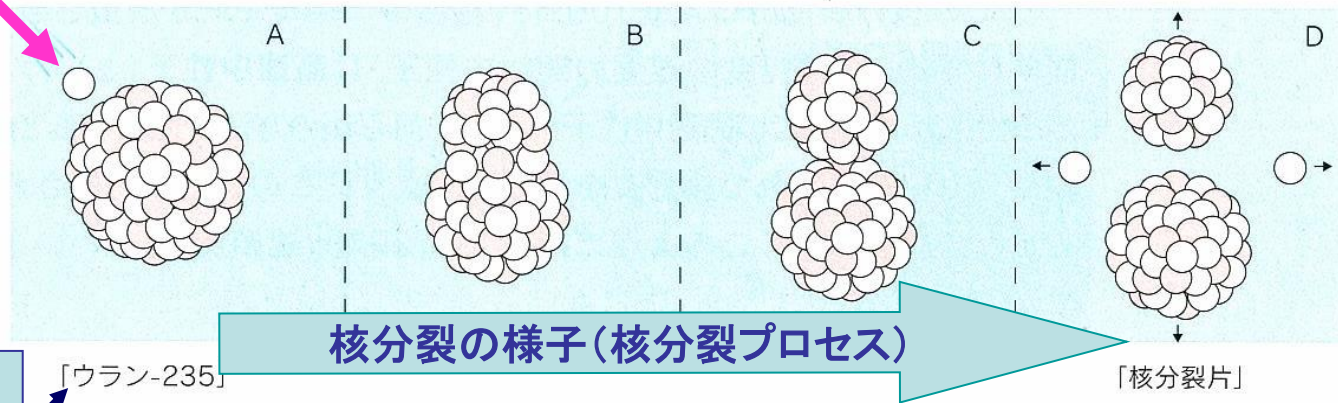
- (1)連鎖反応の制御
- (2)崩壊熱の制御

核分裂反応の様子を示す模式図 および 反応の代表例

図表 2-5：核分裂反応の様子を示す模式図

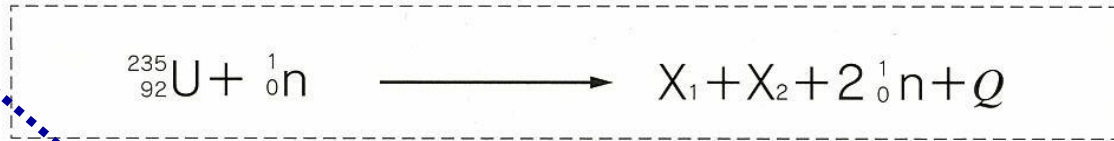
中性子

○：中性子 ○：陽子

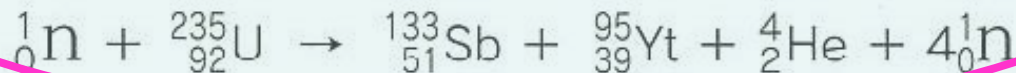
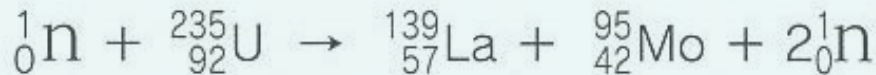
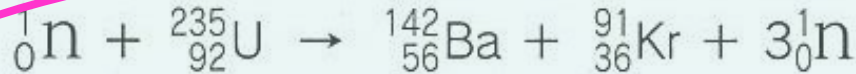


核分裂の様子(核分裂プロセス)

ウラン234
ウラン235
ウラン238

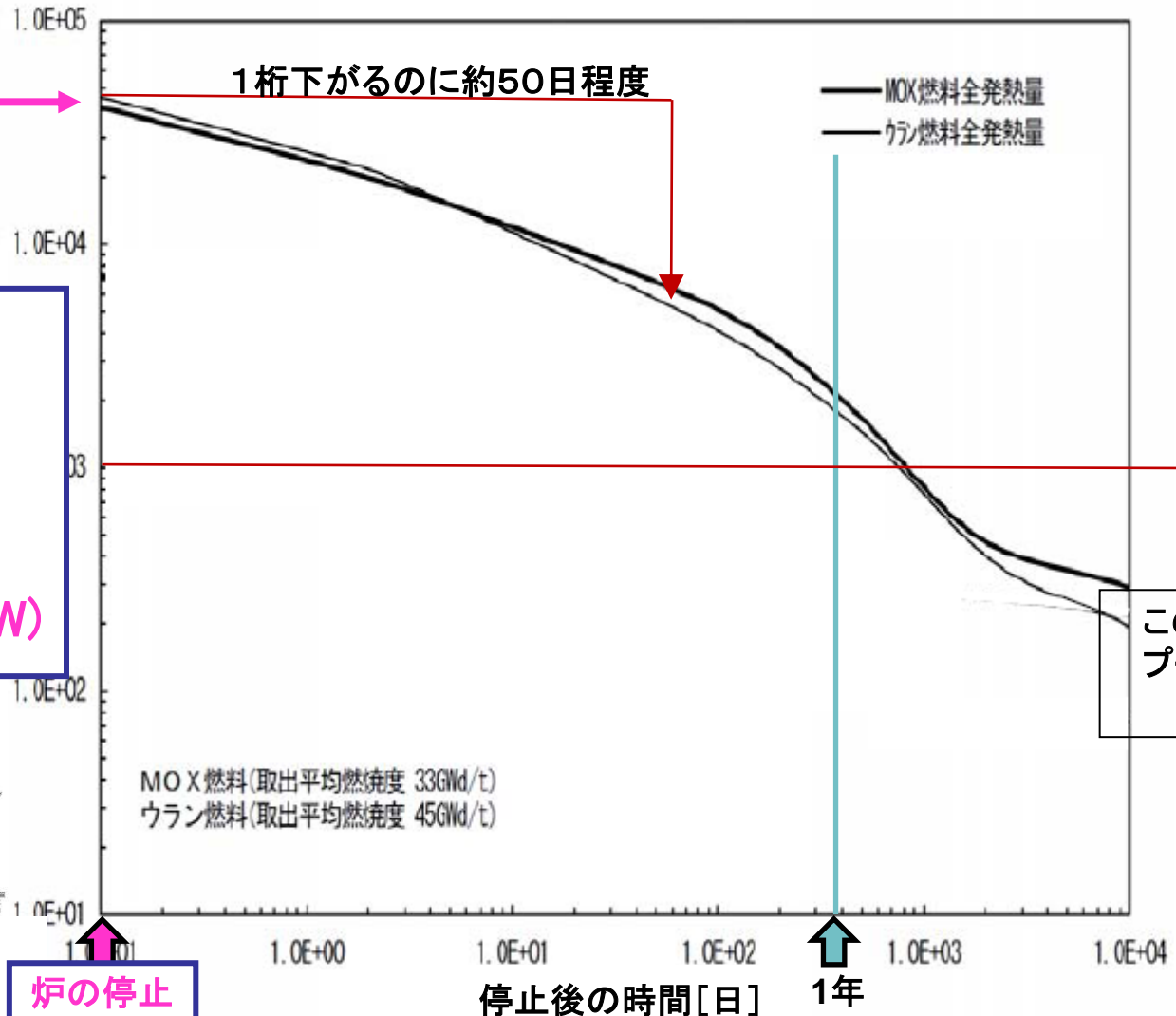


${}_{92}^{235}\text{U}$ の核分裂反応の代表例



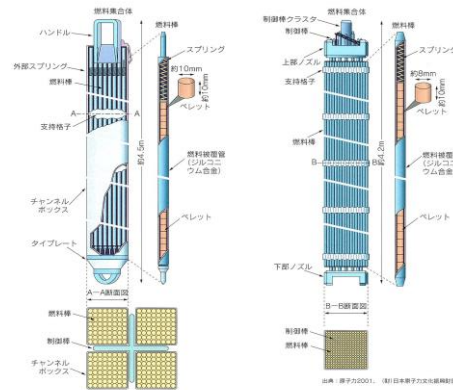
使用済燃料の発熱（崩壊熱）

発電レベルの
 ~ 1/100
 ↓
 それでも
 ~ 10MW (1万kW)



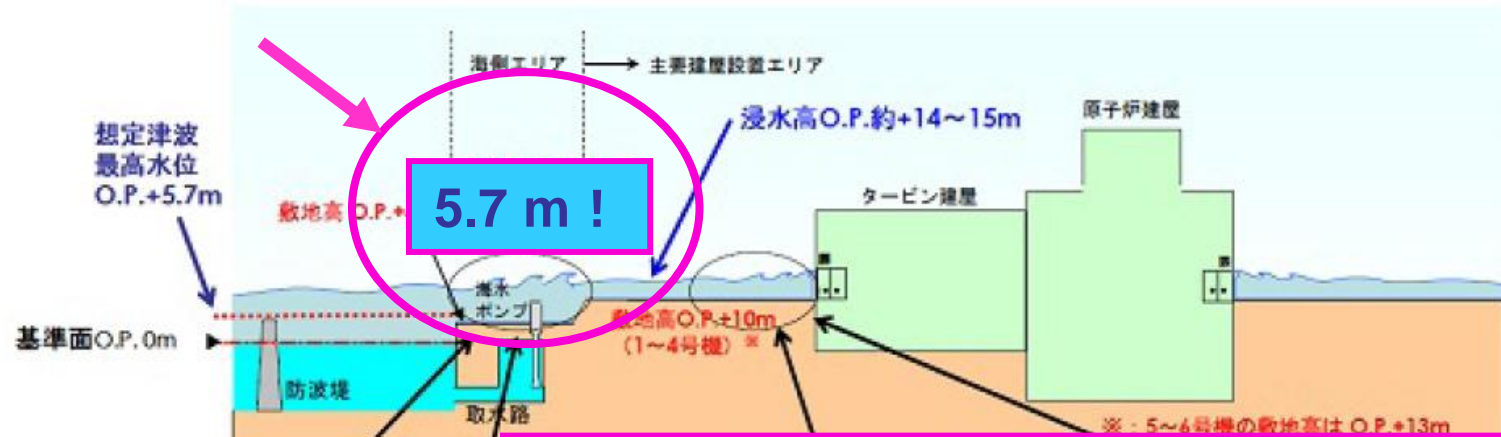
図表 4-5: BWR燃料集合体と制御棒

図表 4-6: PWR燃料集合体と制御棒



忘れがちな点 = 忘れてはならない点！

福島第一発電所の津波



<http://www.meti.go.jp/press/2011/04/20110413006/20110413006.pdf>

なぜ？
設計時の経済性尊重？
事故率の想定？（安全に対する考え方）
輸入から始まった科学技術

海水ポンプが浸水し停止



全冷却系喪失

タービン建屋の非常用
ディーゼル発電機が浸水し停止



全交流電源喪失

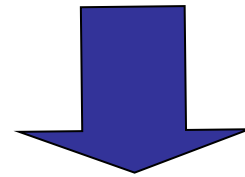
ポンプ、
計器、
弁など
停止

バッテリーは約8時間しかもたない

数値・桁数の違いと質の違い：成功率・失敗率

安全性も数値化

単位 [台・年] : 30~50台 X ~40年 = ~ 2×10^3
大事故 : 2回 (JCO [1999]、3.11福島第1原発 [2011])
大事故率 [(台・年)⁻¹] : ~ 10^{-3} (これまで)



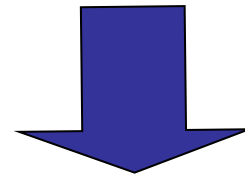
<単純化試算>

大事故率の目標(例えば) :
~ $(10^2 \text{台} \times 10^{4 \sim 5} \text{年})^{-1} = 10^{-6} \sim 10^{-7}$

数値・桁数の違いと質の違い：成功率・失敗率

安全性も数値化

単位 [台・年] : 30~50台 X ~40年 = $\sim 2 \times 10^3$
大事故 : 2回 (JCO [1999]、3.11福島第1原発 [2011])
大事故率 [(台・年)⁻¹] : $\sim 10^{-3}$ (これまで)



<単純化試算>

大事故率の目標(例えば) :
 $\sim (10^2 \text{台} \times 10^{4 \sim 5} \text{年})^{-1} = 10^{-6} \sim 10^{-7}$

[3] おわりに —— 日本の科学技術と将来

(1) 3.11事故の分析と反省・教訓

- ・ 科学技術への自信(回復)
- ・ 安全と技術 (3.11事故の分析と反省)
- ・ 桁数の重要性、徹底法の一つの考え

(2) 理学と工学 —— 両輪の大切さ

- ・ 理学と工学の違い
- ・ 両輪の大切さ、「ICPP」主催の知見
- ・ 科学技術立国(?)の将来

(3) 最近の日本の科学技術 —— 明確な低落傾向

- ・ 最近の状況 —— 科学技術軽視 / 理系軽視、
科学技術研究費、論文数、大学院生数、etc

成功率・失敗率と完成度 ----- 一例として

成功率	不成功率・失敗率	コメント・例 etc.
• 7-8割方 (0.7~0.8)	20~30 %	7-8割方 (しかし、-----)
• 10中8, 9 (0.8~0.9)	10~20 %	-----
• 90 % (0.9)	10 %	} 安全性の数値化 (困難ではあるが)
• 95 % (0.95)	5 %	
• 97 % (0.97)	3 % = $\sim 1/30$	} しかしこの差は大きい
• 99 % (0.99)	1 % = $1/100$	
• 99.9 % (0.999)	0.1 % = $1/1000$	} 例え、ガスボンベの純度
• 0.9999	0.01 % = $1/10000$	
• 0.99999	0.001 % = $1/100000$ (10^{-5})	
• 0.999999 (6-nine)		
• 0.9999999		
• 0.99999999		} 1年 = 365.242199 日
• 0.999999999		
• 0.9999999999		
• 0.99999999999		
• 0.999999999999		
• 0.9999999999999		
• 0.99999999999999		
• 0.999999999999999		
• 0.9999999999999999 (15-nine)		

(注:セシウム原子時計:1億年に1秒、ストロンチウム光格子時計:300億年に1秒)

セシウム原子時計
9,192,631

既に行われている
原子炉の安全性の数値:
1基1年間稼働当り
(10^{-3} ~ 10^{-5})
⇒ もっと桁上げの必要!

成功率・失敗率と完成度 ----- 一例として

成功率	不成功率・失敗率	コメント・例 etc.
• 7-8割方 (0.7~0.8)	20~30 %	7-8割方 (しかし、-----)
• 10中8, 9 (0.8~0.9)	10~20 %	十中八九 (しかし、-----)
• 90 % (0.9)	10 % = 1/10	} 10% ~ 1% の範囲は、 } しかしこの差は大きい
• 95 % (0.95)	5 % = 1/20	
• 97 % (0.97)	3 % = ~1/30	
• 99 % (0.99)	1 % = 1/100	
• 99.9 % (0.999)	0.1 % = 1/1000	
• 0.9999	0.01 % = 1/10000	} 例え、ガスボンベの純度 } 1年 = 365.242199 日
• 0.99999	0.001 % = 1/100000 (10 ⁻⁵)	
• 0.999999 (6-nine)		
• 0.9999999		
• 0.99999999		
• 0.999999999		
• 0.9999999999		
• 0.99999999999		
• 0.999999999999		
• 0.9999999999999 (15-nine)		

(注: セシウム原子時計: 1億年に1秒、ストロンチウム光格子時計: 300億年に1秒)

セシウム原子時計 (誤差 10⁻¹⁵)
9,192,631,770 Hz

成功率・失敗率と完成度 ----- 一例として

成功率	不成功率・失敗率	コメント・例 etc.
• 7-8割方 (0.7~0.8)	20~30 %	7-8割方 (しかし、-----)
• 10中8, 9 (0.8~0.9)	10~20 %	十中八九 (しかし、-----)
• 90 % (0.9)	10 % = 1/10	} しかしこの差は大きい
• 95 % (0.95)	5 % = 1/20	
• 97 % (0.97)	3 % = ~1/30	
• 99 % (0.99)	1 % = 1/100	
• 99.9 % (0.999)	0.1 % = 1/1000	
• 0.9999	0.01 % = 1/10000	} 例え、ガスボンベの純度
• 0.99999	0.001 % = 1/100000 (10 ⁻⁵)	
• 0.999999 (6-nine)		} 1年 = 365.242199 日
• 0.99999999		
• 0.999999999		
• 0.9999999999		
• 0.99999999999		
• 0.999999999999		
• 0.9999999999999		
• 0.99999999999999		
• 0.999999999999999		
• 0.9999999999999999 (15-nine)		

(注: セシウム原子時計: 1億年に1秒、ストロンチウム光格子時計: 300億年に1秒)

セシウム原子時計 (誤差 10⁻¹⁵)

9,192,631,770

科学技術の広がり

成功率・失敗率と完成度 ----- 一例として

成功率	不成功率・失敗率	コメント・例 etc.
• 7-8割方 (0.7~0.8)	20~30 %	7-8割方 (しかし、-----)
• 10中8, 9 (0.8~0.9)	10~20 %	十中八九 (しかし、-----)
• 90 % (0.9)	10 % = 1/10	} しかしこの差は大きい
• 95 % (0.95)	5 % = 1/20	
• 97 % (0.97)	3 % = ~1/30	
• 99 % (0.99)	1 % = 1/100	
• 99.9 % (0.999)	0.1 % = 1/1000	} 例えば、ガスボンベの純度
• 0.9999	0.01 % = 1/10000	
• 0.99999	0.001 % = 1/100000 (10 ⁻⁵)	
• 0.999999 (6-nine)		
• 0.9999999		
• 0.99999999		
• 0.999999999		1年 = 365.242199 日
• 0.9999999999		
• 0.99999999999		
• 0.999999999999		
• 0.9999999999999		
• 0.99999999999999		
• 0.999999999999999 (15-nine)		

時刻の精度

セシウム原子時計 (誤差 10⁻¹⁵)
9,192,631,770 Hz

(注: セシウム原子時計: 1億年に1秒、ストロンチウム光格子時計: 300億年に1秒)

成功率・失敗率と完成度 ----- 一例として

成功率	不成功率・失敗率	コメント・例 etc.
• 7-8割方 (0.7~0.8)	20~30 %	7-8割方 (しかし、-----)
• 10中8, 9 (0.8~0.9)	10~20 %	十中八九 (しかし、-----)
• 90 % (0.9)	10 % = 1/10	} しかしこの差は大きい
• 95 % (0.95)	5 % = 1/20	
• 97 % (0.97)	3 % = ~1/30	
• 99 % (0.99)	1 % = 1/100	
• 99.9 % (0.999)	0.1 % = 1/1000	
• 0.9999	0.01 % = 1/10000	} 例えば、ガスボンベの純度
• 0.99999	0.001 % = 1/100000 (10 ⁻⁵)	
• 0.999999 (6-nine)		
• 0.9999999		
• 0.99999999		
• 0.999999999		
• 0.9999999999		
• 0.99999999999		
• 0.999999999999		
• 0.9999999999999 (15-nine)		

身近な例から-----

1年 = 365.242199 日

(注: セシウム原子時計: 1億年に1秒、ストロンチウム光格子時計: 300億年に1秒)

セシウム原子時計 (誤差 10⁻¹⁵)
9,192,631,770 Hz

成功率・失敗率と完成度 ----- 一例として

成功率

不成功率・失敗率

コメント・例 etc.

- 7-8割方 (0.7~0.8)
- 10中8, 9 (0.8~0.9)
- 20~30 %
- 10~20 %
- 7-8割方 (しかし、-----)
- 十中八九 (しかし、-----)

•	1年 = 365.242199 日	
•	365	
•	<hr/>	
•	+ 0.242199 [日/年]	
•	x4 + 0.968796	
•	<hr/>	
•	- 1.0	--- 4年に1回(うるう年)
•	<hr/>	
•	- 0.031204 [日/4年]	
•	x25 - 0.780100	
•	<hr/>	
•	+ 1.0	--- 100年に1回(平年)
•	<hr/>	
•	+ 0.219900 [日/100年]	
•	x4 + 0.879600	
•	<hr/>	
•	- 1.0	--- 400年に1回(うるう年)
•	<hr/>	
•	- 0.120400 [日/4年]	
•	x8 + 0.963200	
•	<hr/>	
•	- 1.0	--- 3200年に1回(平年)
•	<hr/>	
•	- 0.036800	
•	---	

しかしこの差は大きい

例えば、ガスボンベの純度

1年 = 365.242199 日

セシウム原子時計(誤差 10^{-15})
9,192,631,770 Hz

(注: セシウム原子時計: 1億年に1秒、ストロンチウム原子時計: 300億年に1秒)

成功率・失敗率と完成度 ----- 一例として

成功率

不成功率・失敗率

コメント・例 etc.

- 7-8割方 (0.7~0.8)
- 10中8, 9 (0.8~0.9)
- 20~30 %
- 10~20 %
- 7-8割方 (しかし、-----)
- 十中八九 (しかし、-----)

1年 = 365.242199 日

	365	
+	0.242199	[日/年]
x4	0.968796	
-	1.0	--- 4年に1回(うるう年)
-	0.031204	[日/4年]
x25	0.780100	
+	1.0	-- 100年に1回(平年)
+	0.219900	[日/100年]
x4	0.879600	
-	1.0	- - 400年に1回(うるう年)
-	0.120400	[日/4年]
x8	0.963200	
-	1.0	--- 3200年に1回(平年)
-	0.036800	

しかしこの差は大きい

例えば、ガスボンベの純度

1900年、2100年は！

2000年(15年前)は例外中の例外だった！

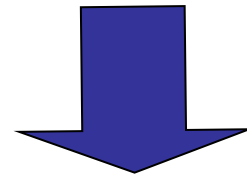
セシウム原子時計(誤差 10^{-15})
9,192,631,770 Hz

(注: セシウム原子時計: 1億年に1秒、ストロンチウム原子時計: 300億年に1秒)

数値・桁数の違いと質の違い：成功率・失敗率

安全性も数値化

単位 [台・年] : 30~50台 X ~40年 = ~ 2×10^3
大事故 : 2回 (JCO [1999]、3.11福島第1原発 [2011])
大事故率 [(台・年)⁻¹] : ~ 10^{-3} (これまで)



<単純化試算>

大事故率の目標(例えば) :
~ $(10^2 \text{台} \times 10^{4 \sim 5} \text{年})^{-1} = 10^{-6} \sim 10^{-7}$

成功率・失敗率と完成度 ----- 一例として

成功率	不成功率・失敗率	コメント・例 etc.
• 7-8割方 (0.7~0.8)	20~30 %	7-8割方 (しかし、-----)
• 10中8, 9 (0.8~0.9)	10, 20 %	十中八九 (しかし、-----)
• 90 % (0.9)		
• 95 % (0.95)		
• 97 % (0.97)		} しかしこの差は大きい
• 99 % (0.99)	1 % = 1/100	
• 99.9 % (0.999)	0.1 % = 1/1000	} 例え、ガスボンベの純度
• 0.9999	0.01 % = 1/10000	
• 0.99999	0.001 % = 1/100000 (10 ⁻⁵)	
• 0.999999 (6-nine)		
• 0.9999999		
• 0.99999999		
• 0.999999999		
• 0.9999999999		
• 0.99999999999		
• 0.999999999999		
• 0.9999999999999		
• 0.99999999999999		
• 0.999999999999999 (15-nine)		

安全性の数値化
(困難ではあるが)

科学技術に完璧はない
しかし、完璧を目指せ！

セシウム原子時計 (誤差 10⁻¹⁵)
9,192,631,770 Hz

(注: セシウム原子時計: 1億年に1秒、ストロンチウム原子時計: 300億年に1秒)

[3] おわりに —— 日本の科学技術と将来

(1) 3.11事故の分析と反省・教訓

- ・ 科学技術への自信(回復)
- ・ 安全と技術 (3.11事故の分析と反省)
- ・ 桁数の重要性、徹底法の一つの考え

(2) 理学と工学 —— 両輪の大切さ

- ・ 理学と工学の違い
- ・ 両輪の大切さ、「ICPP」主催の知見
- ・ 科学技術立国(?)の将来

(3) 最近の日本の科学技術 —— 明確な低落傾向

- ・ 最近の状況 —— 科学技術軽視 / 理系軽視、
科学技術研究費、論文数、大学院生数、etc

徹底法 ——身近な例から

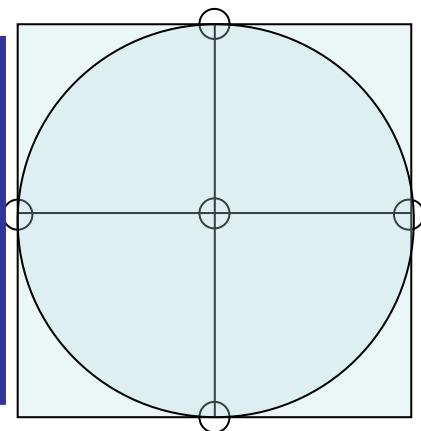
川柳：「居候、四角い部屋を丸く掃き」

四角い部屋を
「丸く掃くな！」 = 「四角く掃こう！」

「徹底したやり方」が極めて大切！：長年、周囲に力説

川柳：「居候、四角い部屋を丸く掃き」

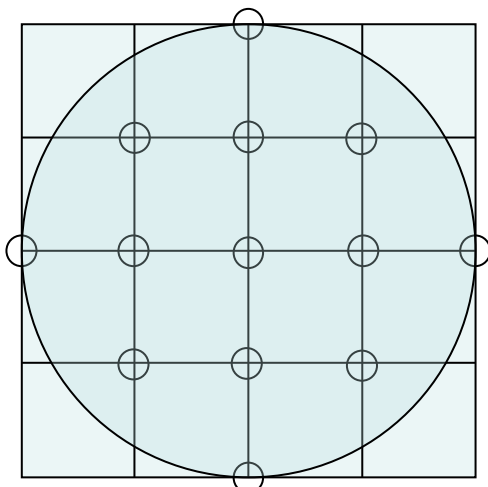
3点の場合



パラメーター B

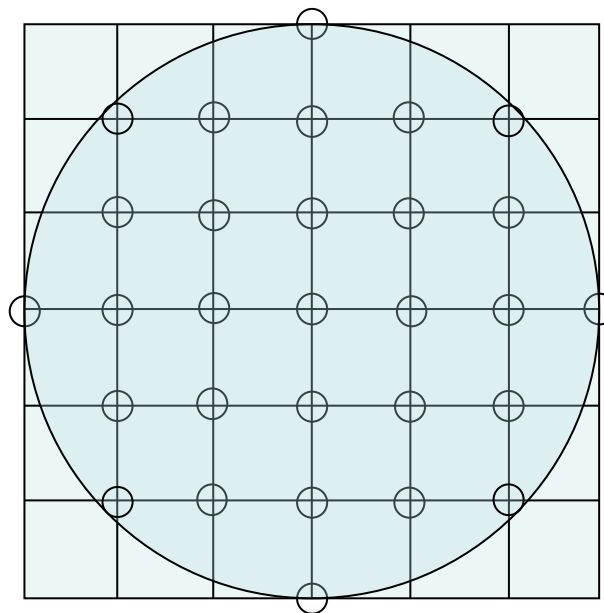
パラメーター A

5点の場合



パラメーター A

7点の場合



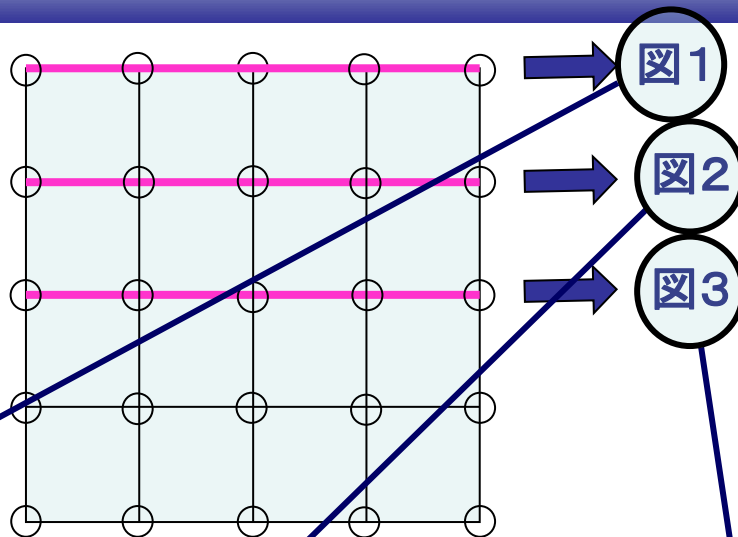
パラメーター A

「徹底したやり方」が極めて大切！ : 長年、周囲に力説

川柳：「居候、四角い部屋を丸く掃き」

「四角い部屋を四角く掃く」
場合
(例えば: 5点データの場合)

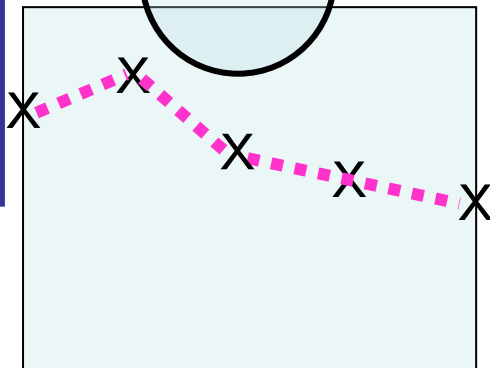
パラメーター B



パラメーター A

図1

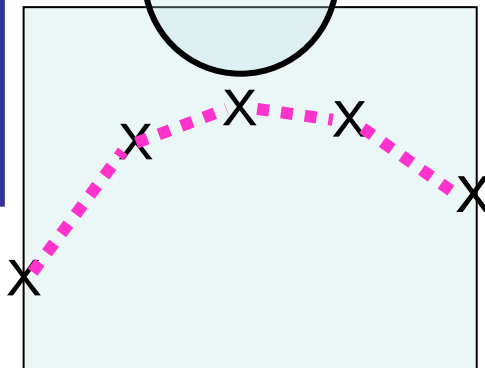
評価値



パラメーター A

評価値

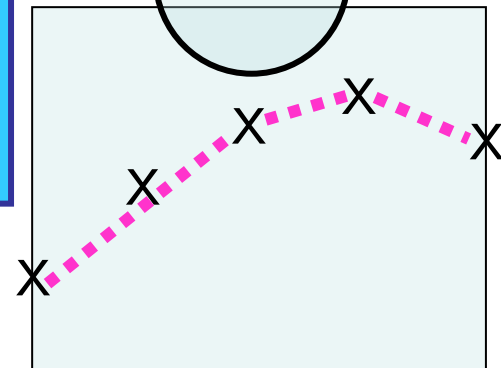
図2



パラメーター A

評価値

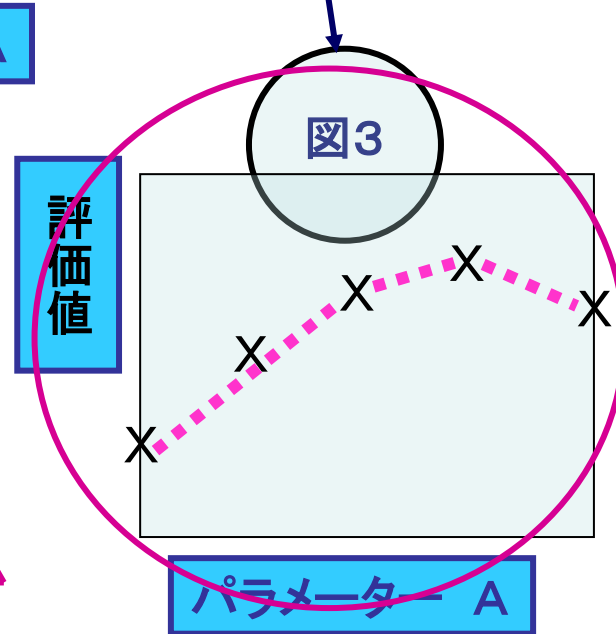
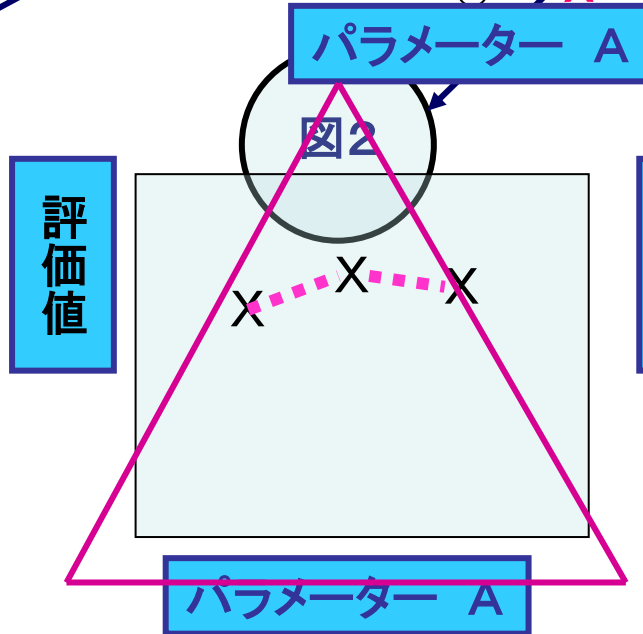
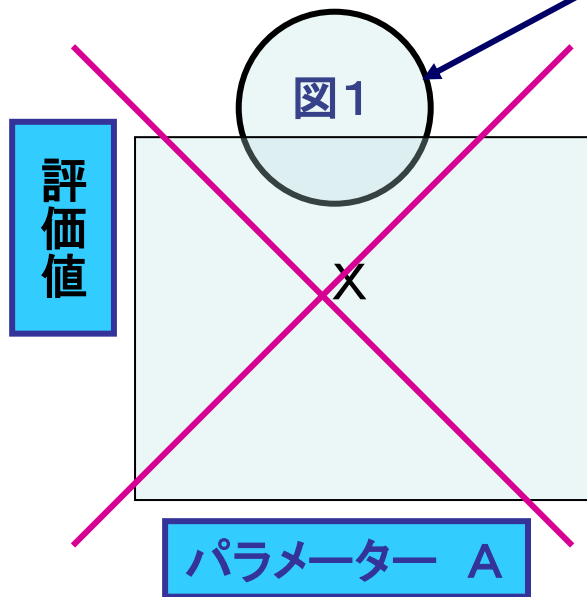
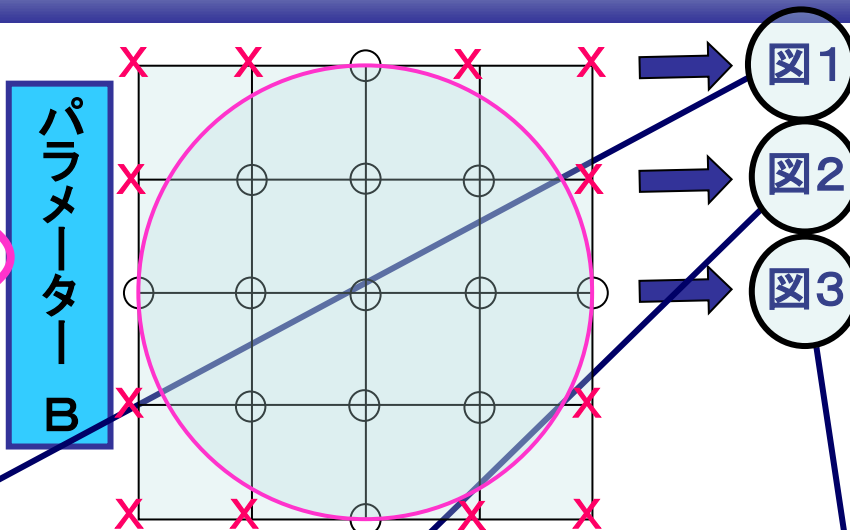
図3



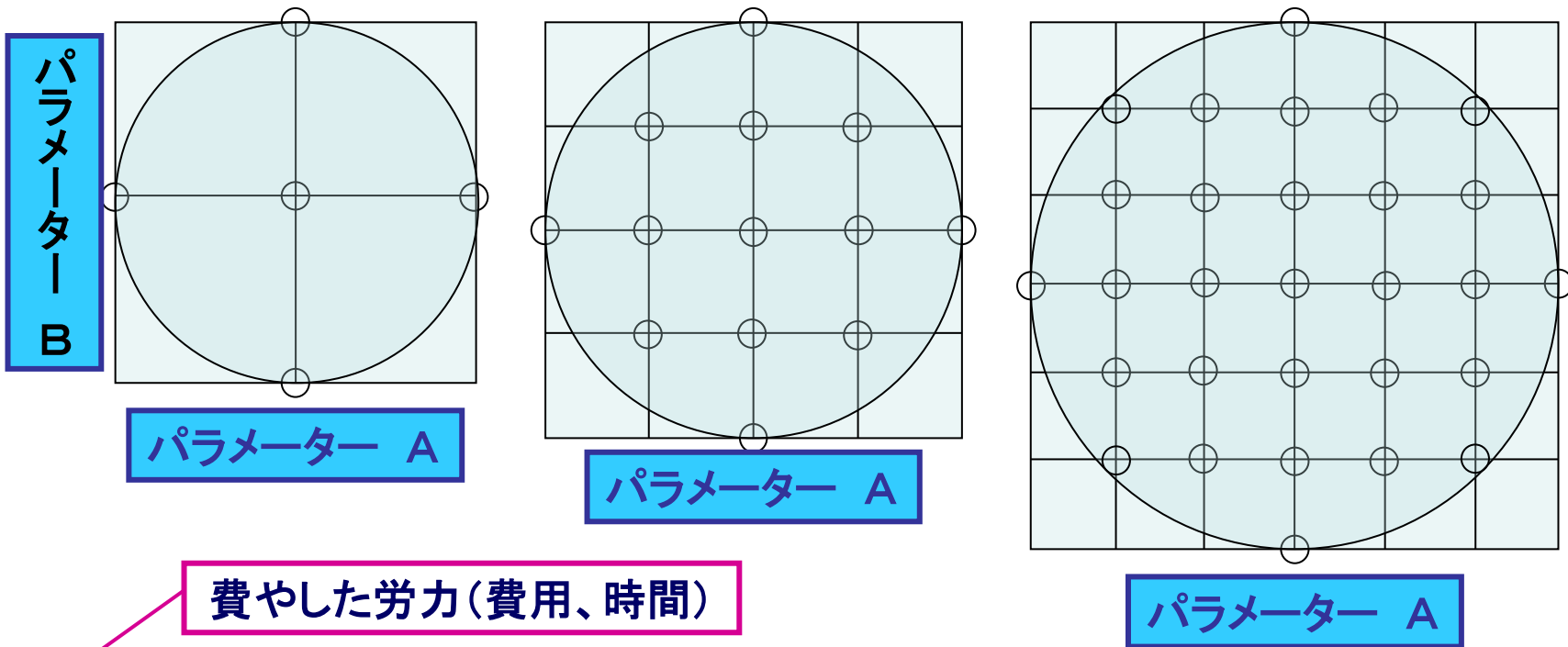
パラメーター A

川柳 : 「居候、四角い部屋を丸く掃き」

「四角い部屋を丸く掃く」とどうなるか？
(例えば: 5点データの場合)



川柳：「居候、四角い部屋を丸く掃き」



費やした労力(費用、時間)

データ点取得率: $5/9 = 0.55$

$13/25 = 0.52$

$29/49 = 0.59$

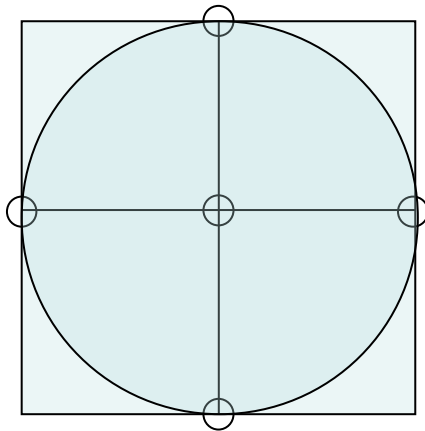
有効グラフ取得率: $2/6 = 0.33$

$2/10 = 0.20$

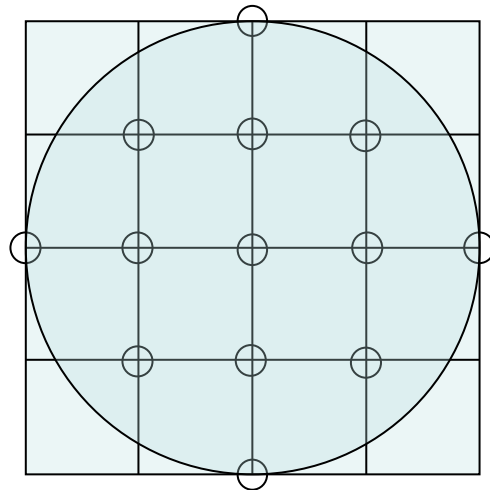
$2/14 = 0.14$

得られた収穫(OUTPUT)

川柳：「居候、四角い部屋を丸く掃き」

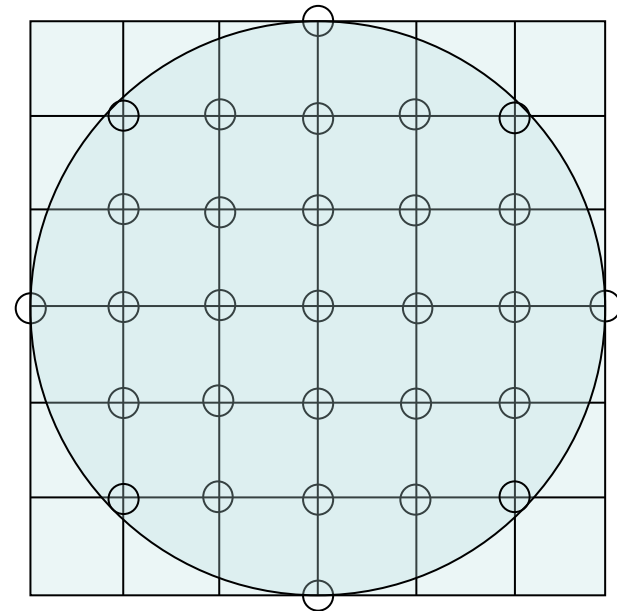


$$2/6 = 0.33$$



$$2/10 = 0.20$$

有効グラフ取得率



$$2/14 = 0.14$$

**徹底したやり方が：時間や労力が多少余分にかかっても、
極めて大切！ 結局は、いかに得るものが大きいか！**