

原子力発電所使用済み燃料プールでの 火災の危険性

Jungmin Kang, PhD

姜政敏（カン・ジョンミン）

自然資源防護協議会（NRDC）

衆議院第一議員会館

東京、2017年4月28日

北東アジアの原子力発電所

国	中国	日本	韓国	台湾
原発	36* (32.6 GWe)	42 (40.0 GWe)	25* (23.1 GWe)	6 (4.9 GWe)
建設中	21 (23.1 GWe)	2 (2.8 GWe)	3 (4.2 GWe)	2 (2.6 GWe)
計画中	41 (46.9 GWe)	9 (12.9 GWe)	8 (11.6 GWe)	-

(* :中国には2基の、韓国には4基の加圧重水炉がある)

(Ref: World Nuclear Association, March 2017)

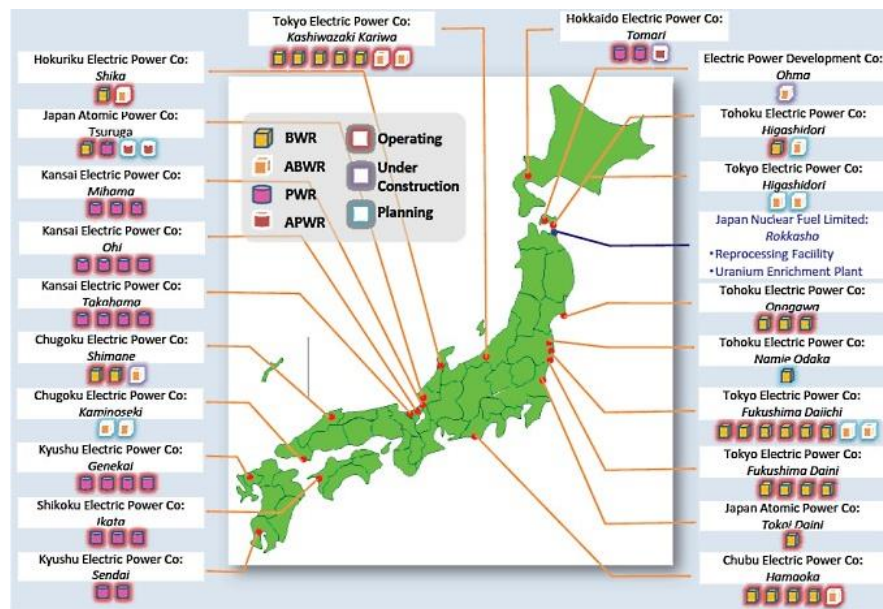
北東アジアの原発立地地点



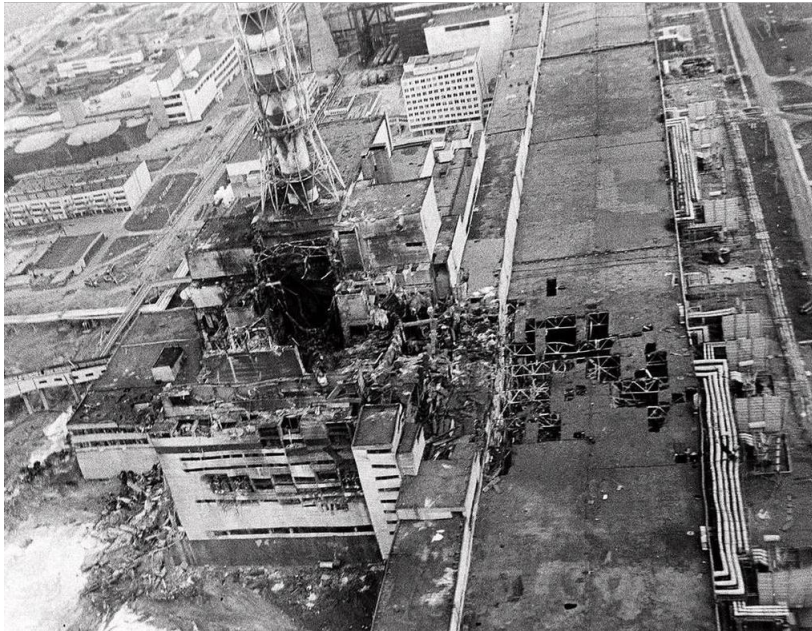
Source: World Nuclear Association



Source: World Nuclear Association



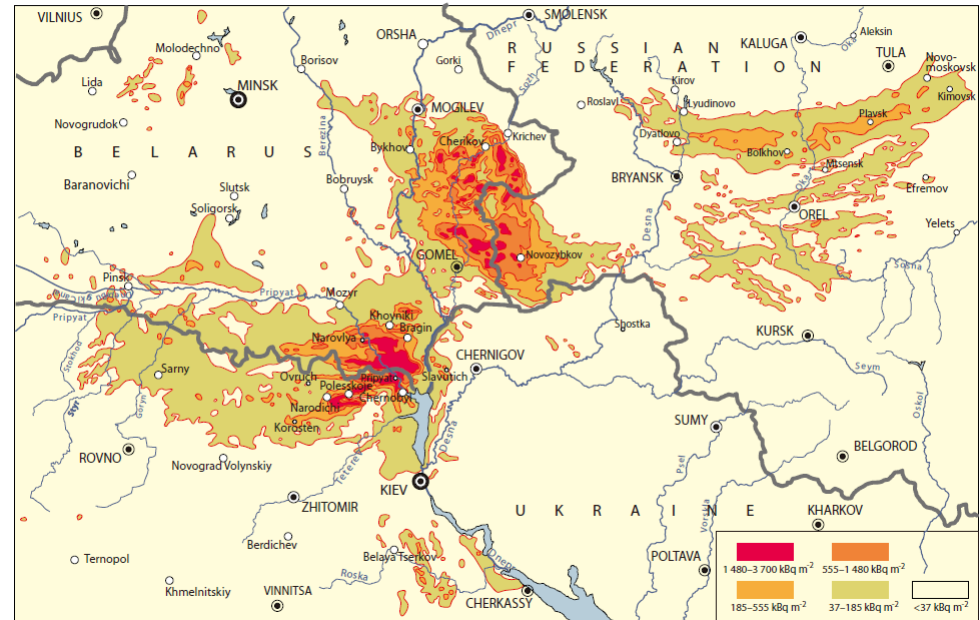
1986年4月 チェルノブイリ原発事故



(Ref: Alan Taylor, "The Chernobyl Disaster: 25 Years Ago," The Atlantic, Mar 23, 2011)

- 100,000人以上の住民が避難
- Cs-137で0.5MBq/m²以上汚染された放射線管理ゾーン10,000 km²

Figure II. Map of ¹³⁷Cs deposition levels in Belarus, the Russian Federation and Ukraine as of December 1989 [I28]



(Ref: "Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes," United Nations, New York, 2011)

(Ref: Robert Alvarez et al., "Reducing the Hazards from Stored Spent Power-Reactor Fuel in the United States," Science and Global Security, 11:1-51, 2003)

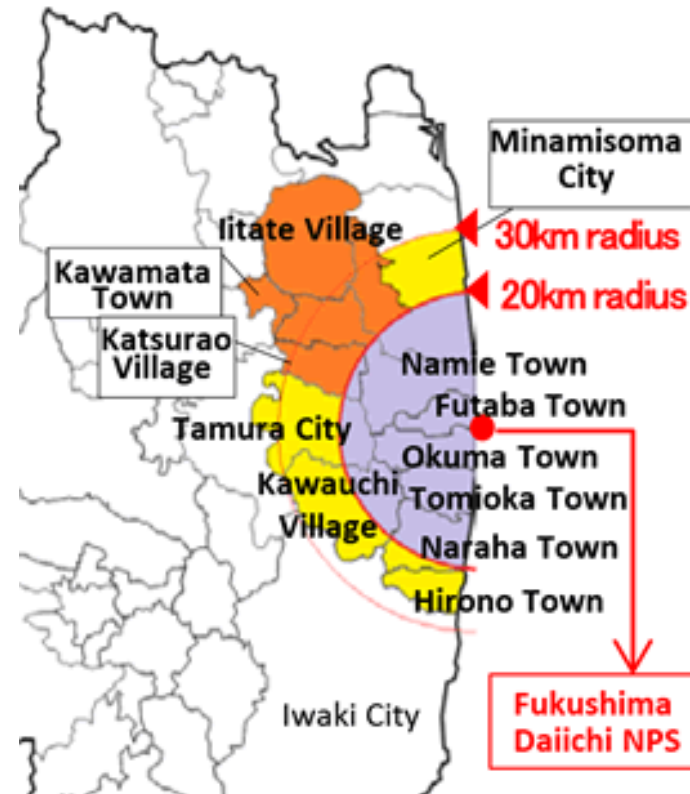
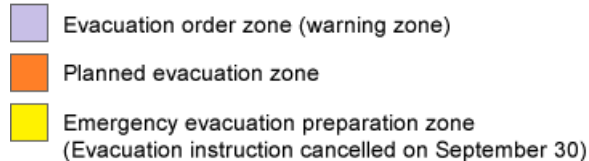
自主的移住: 地表面のCs-137濃度が0.5 MBq/m²を超えるエリア

強制移住: 地表面のCs-137濃度が1.5 MBq/m²を超えるエリア

2011年3月 福島第一原発事故



(Ref: What Went Wrong: Fukushima Nuclear Disaster
(<http://www.popularmechanics.com/science/energy/a6721/>) April 22, 2011
what-went-wro



(Ref: Masa Takubo, "Fukushima disaster today," Busan, Korea, 27 February 2017)

- 100,000人以上の住民が避難
- Cs-137の放出量はおおよそ7-20PBq
 - 事故による放出量は1986年チェルノブイリ原発事故のおおよそ1/10と推定される
 - 放出の多くは北太平洋に拡散した

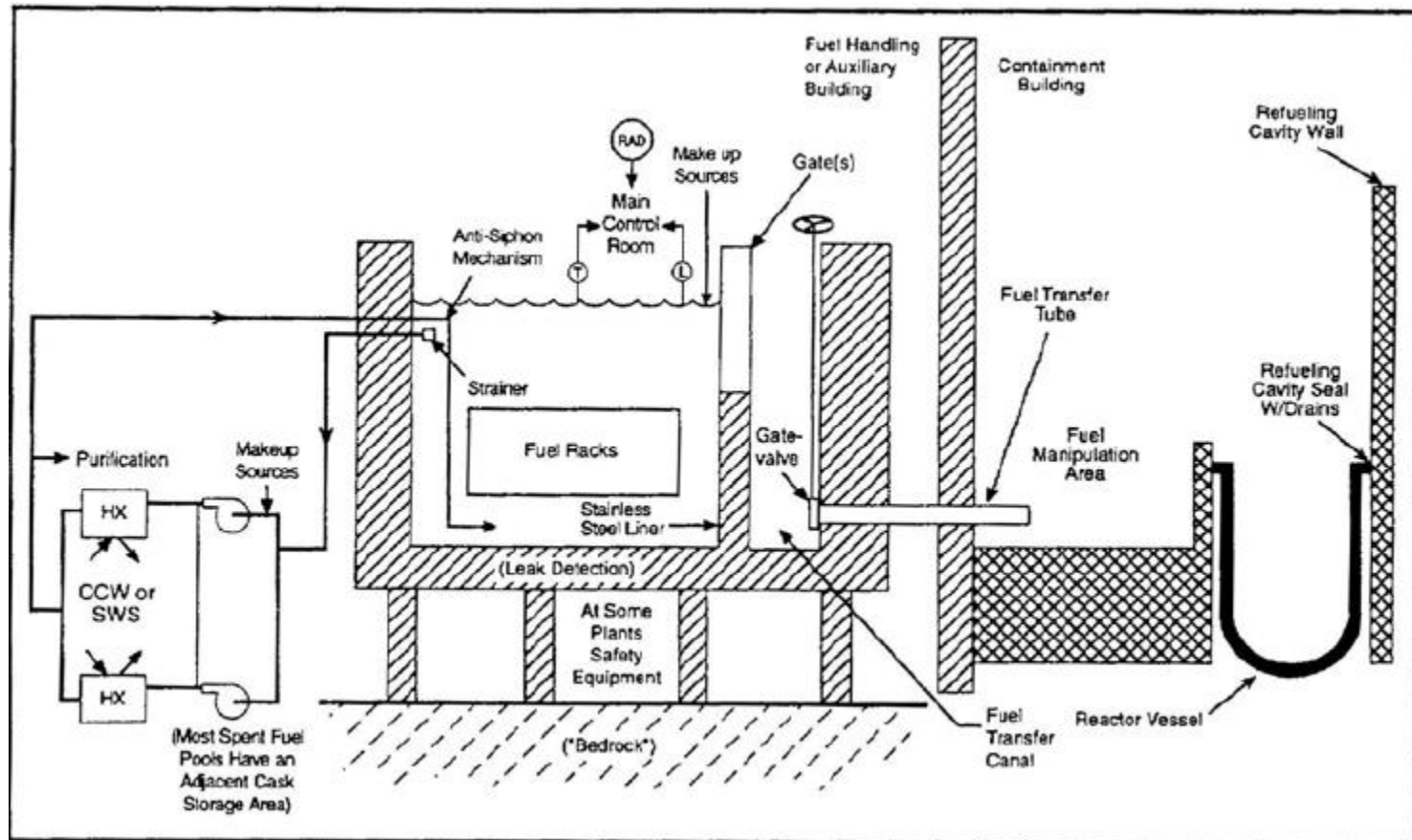
使用済み燃料の危険性

- チェルノブイリ原発事故と福島第一原発事故の共通点
 - 冷却材喪失 -> 装荷中の使用済み燃料溶融 -> 使用済み燃料に含まれる放射性物質が大気に放出される
- 使用済み燃料は高レベルの放射性核種を含む。特にCs-137
 - Cs-137 (半減期30年) は主要な地表汚染源だ。なぜならCs-137は崩壊すると95%が励起状態のBa-137になり、貫通力の高いガンマ線(0.66-MeV)を放出して基底状態に移るからだ。
 - Cs-137はチェルノブイリ原発事故と福島第一原発事故で広範なエリアから長期にわたる住民移住を余儀なくさせた。
 - チェルノブイリ原発事故では約80 PBqが原子炉から放出された
 - 10年間冷却された燃焼度40 MWd/kgHM、1tHM(重金属トン)のPWR使用済み燃料にはCs-137が約4 PBq含まれる。

(Ref: R. Alvarez et al, "Reducing the Hazards from Stored Spent Power-Reactor Fuel in the United States," Science and Global Security, 11:1-51, 2003; Frank von Hippel and Michael Schoeppner, "Reducing the Danger from Fires in Spent Fuel Pools," Science and Global Security, 24:141-173, 2016)

プールでの使用済み燃料冷却

一般的なPWR用使用済み燃料プールの設計



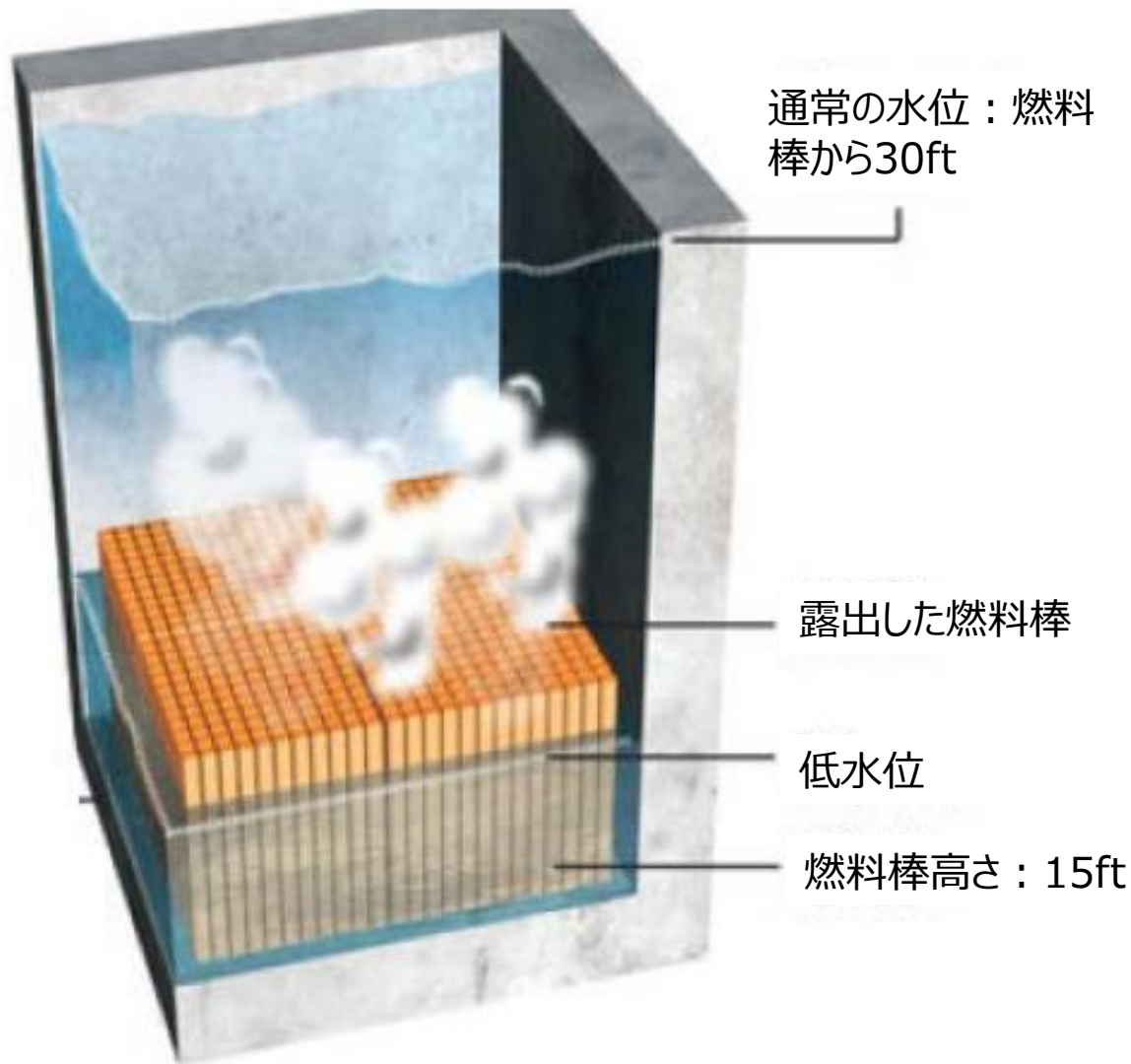
(Ref: Ibarra, J.G., et al., Operating experience feedback report: Assessment of spent fuel cooling, 1997, Report NUREG-1275, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, USA.)

使用済み燃料プールの脆弱性

- 使用済み燃料の冷却材喪失シナリオ
 - 蒸発：冷却水の熱を取り出す冷却システムが損傷した場合(冷却用ポンプや最終ヒートシンクに熱を移す熱交換器の損傷により), 冷却水の温度は上昇し、蒸発を導く
 - 排水：使用済み燃料プールと別のエリアをつなげる配管網に損傷が起きた場合に発生しうる
 - 深刻な損傷 プールの底や壁面への損傷- 例：航空機衝突や重量物の落下

(Ref: "Safety and Security of Commercial Spent Nuclear Fuel Storage: Public Report," The National Academies Press, 2006)

使用済み燃料プール ジルコニウム火災



使用済み燃料プール ジルコニウム火災(続き)

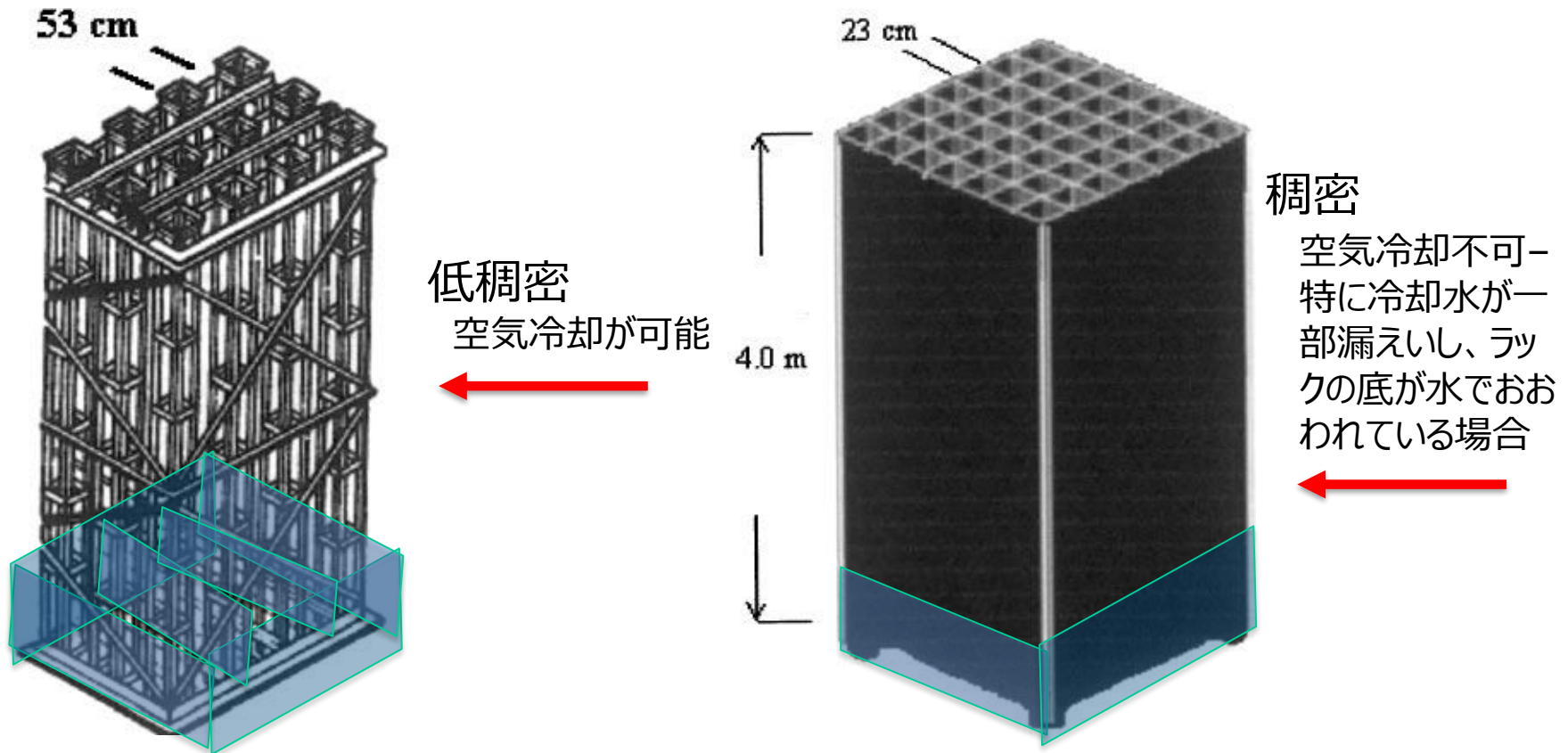
■ ジルコニウム火災

- “もし使用済み燃料の冷却が復旧できない場合、燃料は1000℃程度まで上昇する。この温度では、使用済み燃料のジルコニウム被覆はいわゆる酸化ジルコニウム暴走反応、または自己触媒的発火と呼ばれる空気と高い発熱化学反応を始める。この事故シナリオはよく「使用済み燃料プールジルコニウム火災」と呼ばれている。放射性エアロゾルと蒸気が損傷した使用済み燃料から、使用済み燃料プール建屋を通して周辺環境に放出されうる。”

■ 水素生成

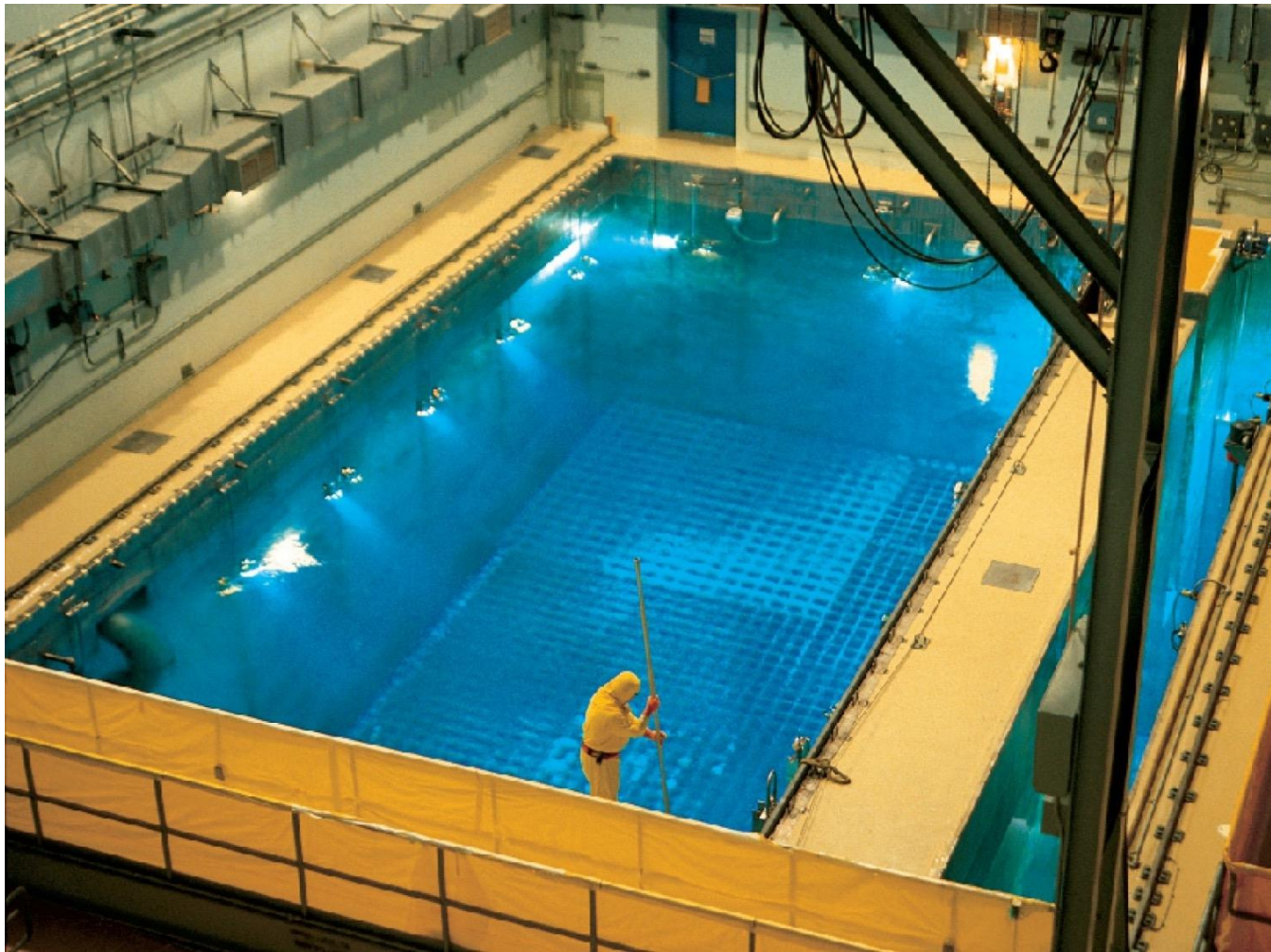
- 水蒸気と高温の使用済み燃料ジルコニウム被覆管が反応して水素が生成される:
$$\text{H}_2\text{O (vapor)} + \text{Zr} \rightarrow \text{H}_2 + \text{ZrO}$$
- 米国原子力規制委員会(US NRC)は低稠密な使用済み燃料プールでは、発生する水素は少なく、爆発はより起こりにくくなるとしている。

低稠密 vs. 稠密 使用済み燃料プール



(Ref: Frank von Hippel, "Proposals for Reducing the Danger from Spent Fuel Pool Fires," Busan, South Korea, 27 February 2017)

米国の稠密化された使用済み燃料プール



(Ref: Frank von Hippel, "Proposals for Reducing the Danger from Spent Fuel Pool Fires," Busan, South Korea, 27 February 2017)

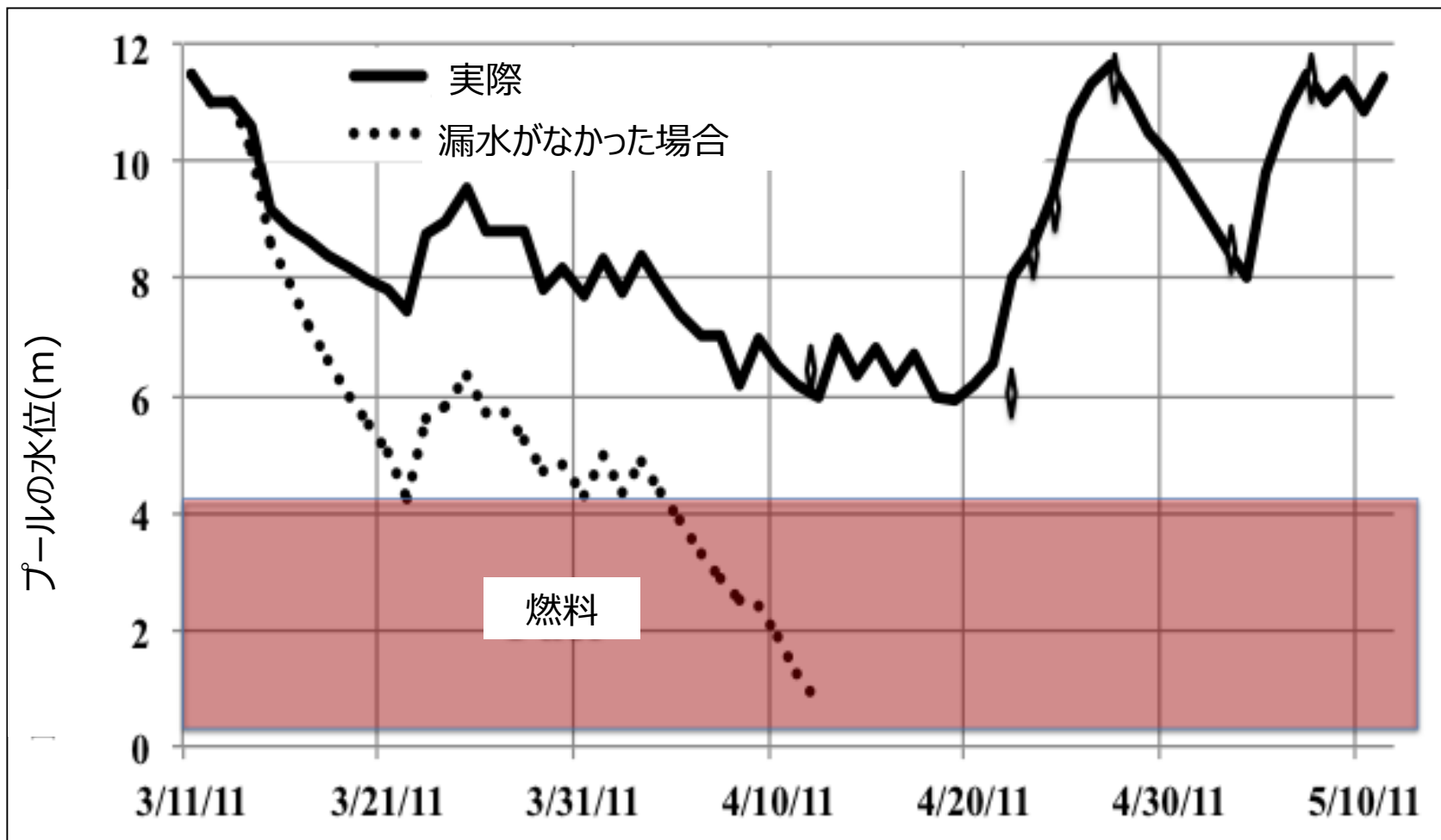
福島第一原発4号機使用済み燃料プールの悪魔のシナリオ

- サイエンス誌（2016年5月27日）
 - “日本の官房長官はそれを「悪魔のシナリオ」と呼んだ。福島第一原発が2011年3月11日の地震と津波に被災し、3つの原子炉が炉心溶融を起こし、放射性プルームを放出した2週間後、当局者はより悪化した事態に備えていた。彼らは原子炉建屋内のプールに貯蔵された使用済み燃料が引火し、放射能の煙が東京を含む東日本の広範囲に広がることを恐れていた。先週のU.S. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicineによれば、怪我の功名により、日本は最悪な状況を回避した”

(Ref: Richard Stone, "Near miss at Fukushima is a warning for U.S.: Panel says spent reactor fuel in a storage pool could have boiled dry and caught on fire," Science 27 May 2016, Vol. 352, Issue 6289, pp. 1039-1040)

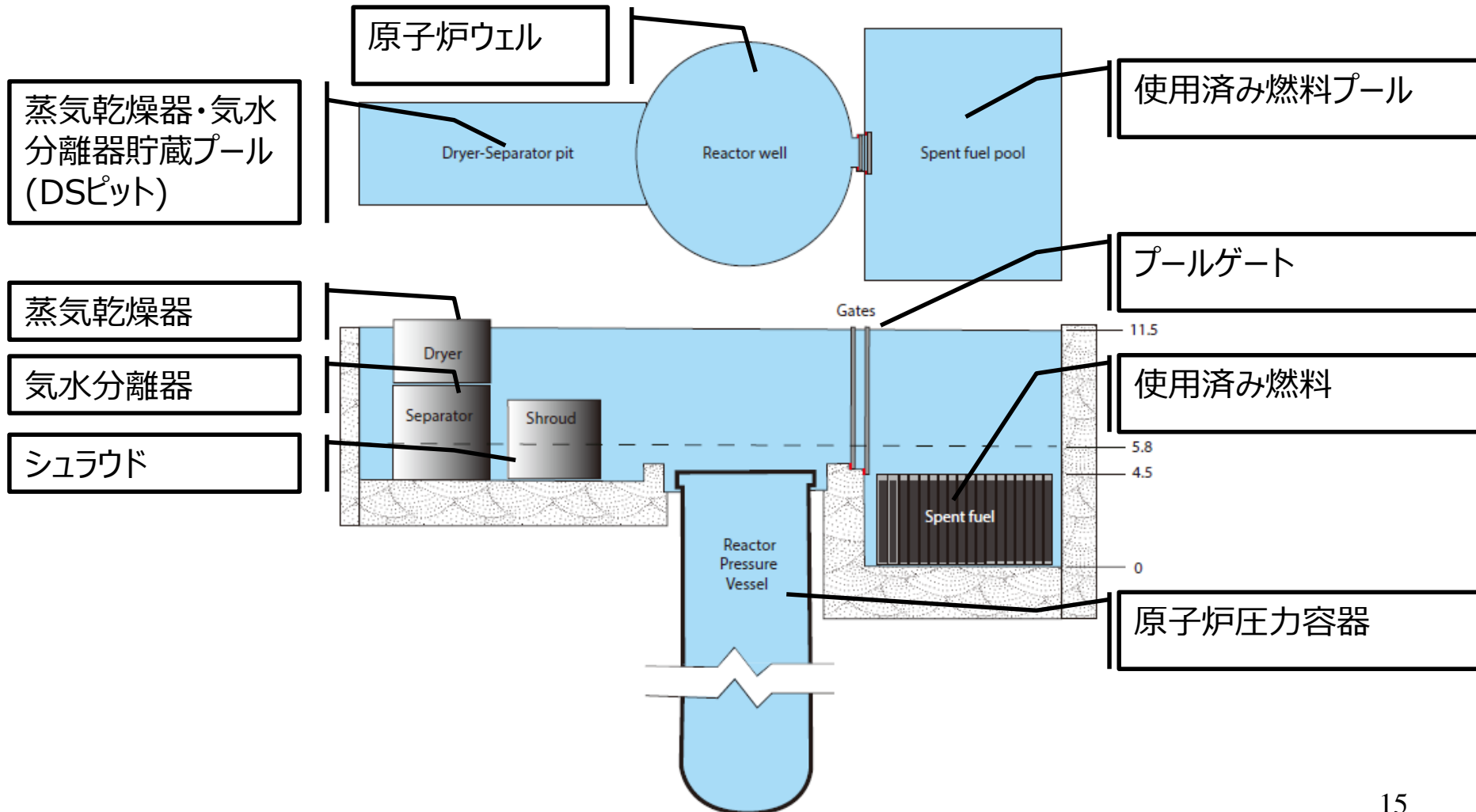
福島第一原発4号機使用済み燃料プールの悪魔のシナリオ(続き)

隣接する原子炉ピットからの漏水が4号機使用済み燃料プールを冷却水喪失から救った



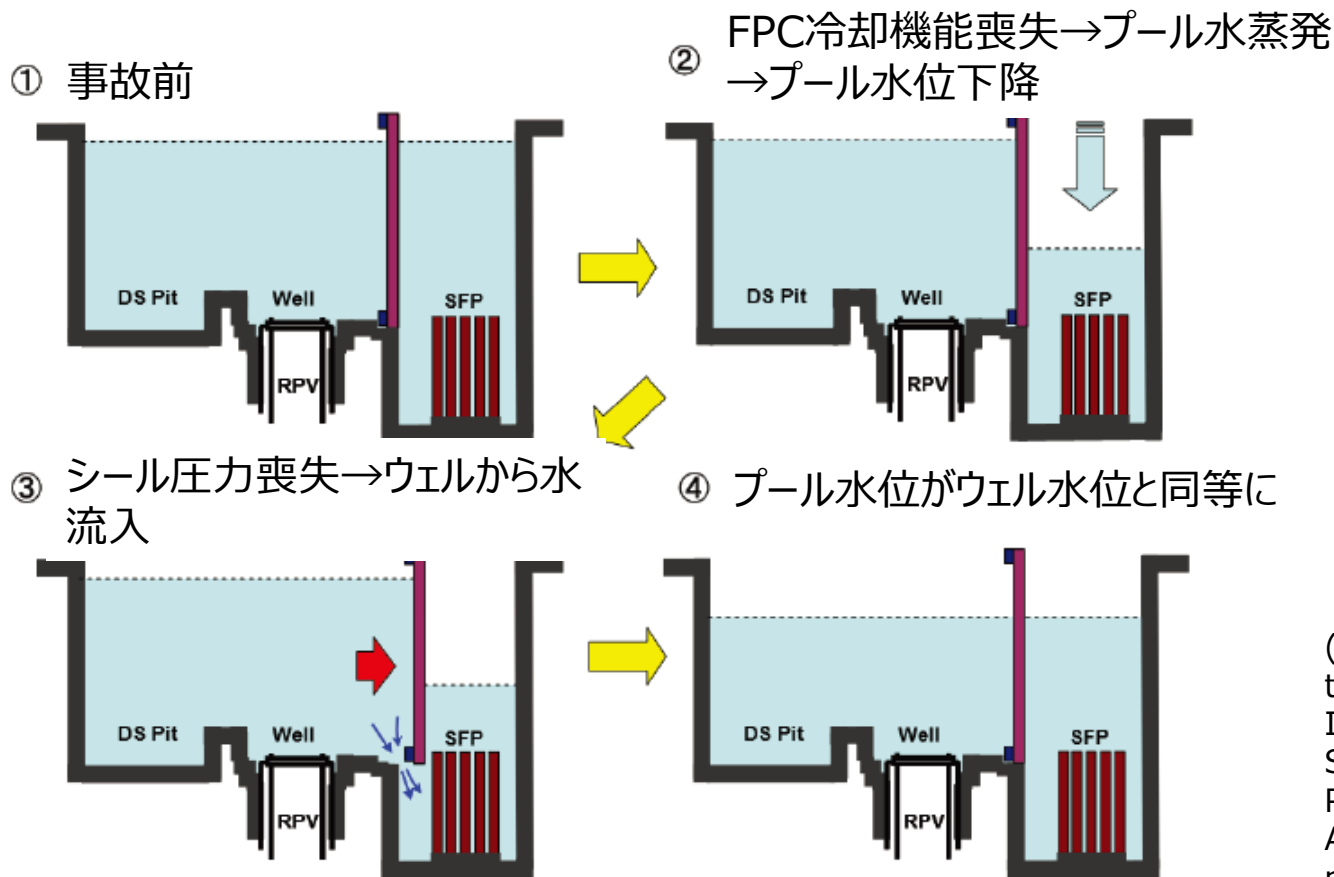
福島第一原発4号機使用済み燃料プールの悪魔のシナリオ(続き)

4号機使用済み燃料プールを冷却材喪失から救った水の供給源



福島第一原発4号機使用済み燃料プールの悪魔のシナリオ(続き)

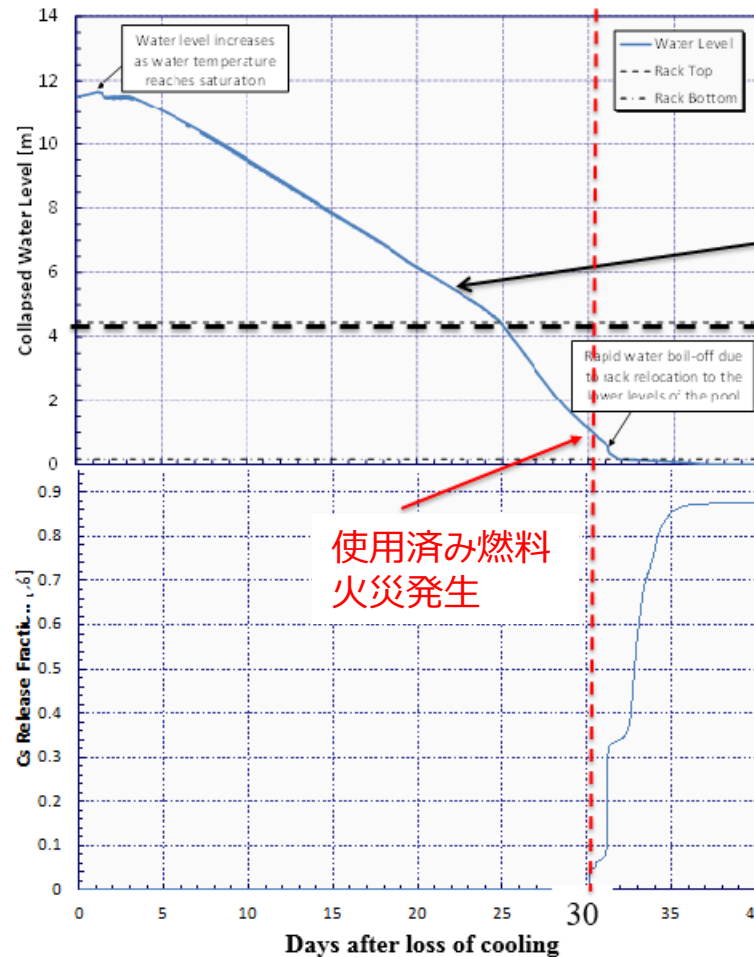
東電が推定した原子炉ウェルから使用済み燃料プールへの水流入の推移
(DS Pit = 蒸気乾燥器・気水分離器貯蔵プール(DSピット); RPV = 原子炉圧力容器; SFP = 使用済み燃料プール; FPC = 使用済み燃料プール冷却浄化系)



(Ref: "Lessons Learned from the Fukushima Accident for Improving Safety and Security of U.S. Nuclear Plants: Phase 2," National Academy of Sciences, 2016, p.45)

福島第一原発4号機使用済み燃料プールの悪魔のシナリオ(続き)

もし水の追加がなければ30日で、プールが漏洩していればもっと早く発火していた。



蒸発時の水位

燃料頭頂部

セシウム放出割合
(5日後に~88%)

(Fukushima Daiichi Accident Study, Status as of April 2012, Sandia, 2012)

(Ref: Frank von Hippel, "Proposals for Reducing the Danger from Spent Fuel Pool Fires," Busan, South Korea, 27 February 2017)

福島第一原発4号機使用済み燃料プールの悪魔のシナリオ(続き)

福島ではCs-137の汚染濃度が1 MBq/m² 以上の場合、移住

福島第一原発事故後
(3/15/2011)

1,100 km²の地域から
88,000 人が移住

4号機使用済み燃料プール火災が起きた場合
HYSPLITによる計算、天候は過去の気象

海向きの風

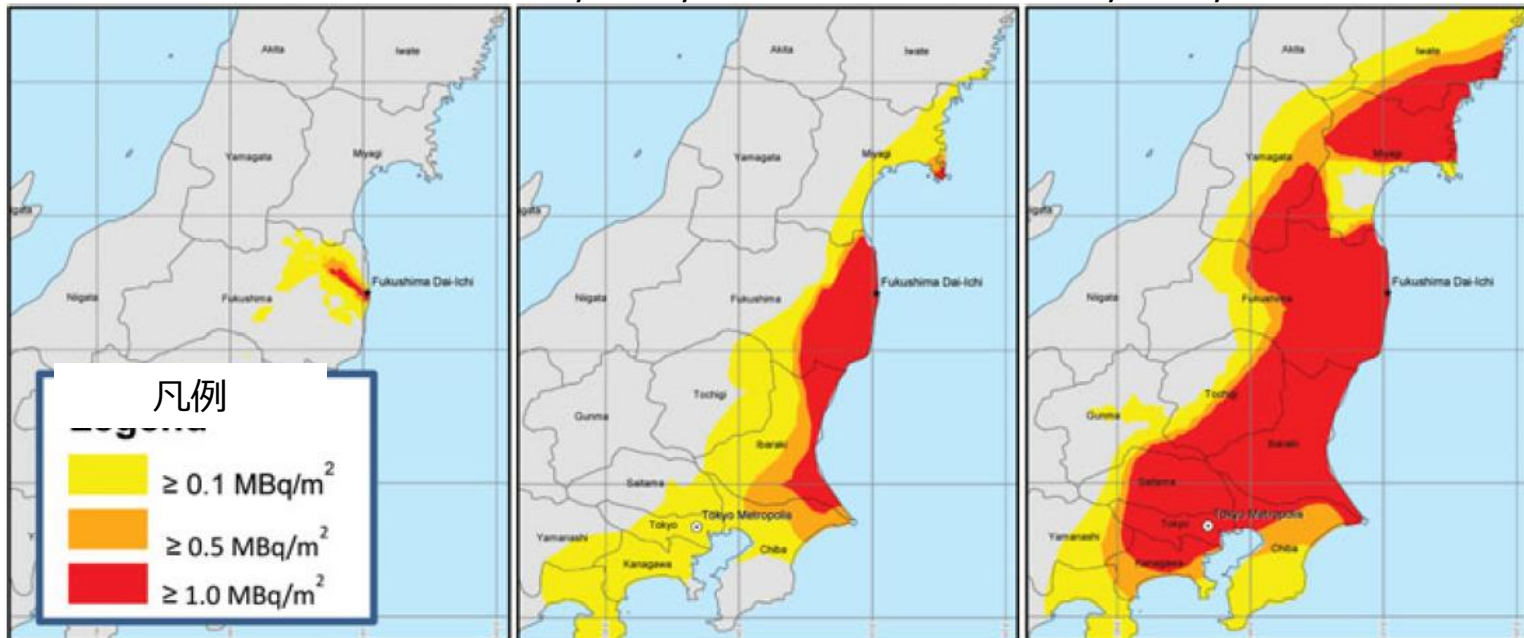
(4/9/2011)

4,300 km²の地域か
1,600,000 人が移住

陸向きの風

(3/19/2011)

31,000 km²の地域か
35,000,000 人が移住



韓国のPWR原発での プール貯蔵使用済み燃料

原子炉	年間使用済み燃料 取り出し量(tHM)	2015年末時点のプール貯蔵使用済み燃料量 (tHM)
古里 1	14.4	114
古里 2	15.9	281
古里 3	20.5	818
古里 4	20.5	797
新古里 1	20.4	154
新古里 2	20.4	98
ハンビット(霊光) 1	20.5	666
ハンビット2	20.5	456
ハンビット3	20.4	372
ハンビット4	20.4	378
ハンビット5	20.4	255
ハンビット6	20.4	254
ハヌル(蔚珍) 1	20.5	401
ハヌル 2	20.5	408
ハヌル 3	20.4	430
ハヌル 4	20.4	404
ハヌル 5	20.4	231
ハヌル 6	20.4	206
新月城 1	20.4	47
新月城 2	20.4	20

(Ref: Author's estimation, based on relevant data as of the end of 2014)

古里3号機の使用済み燃料プール内使用済み燃料のプール火災の Cs-137 放出量

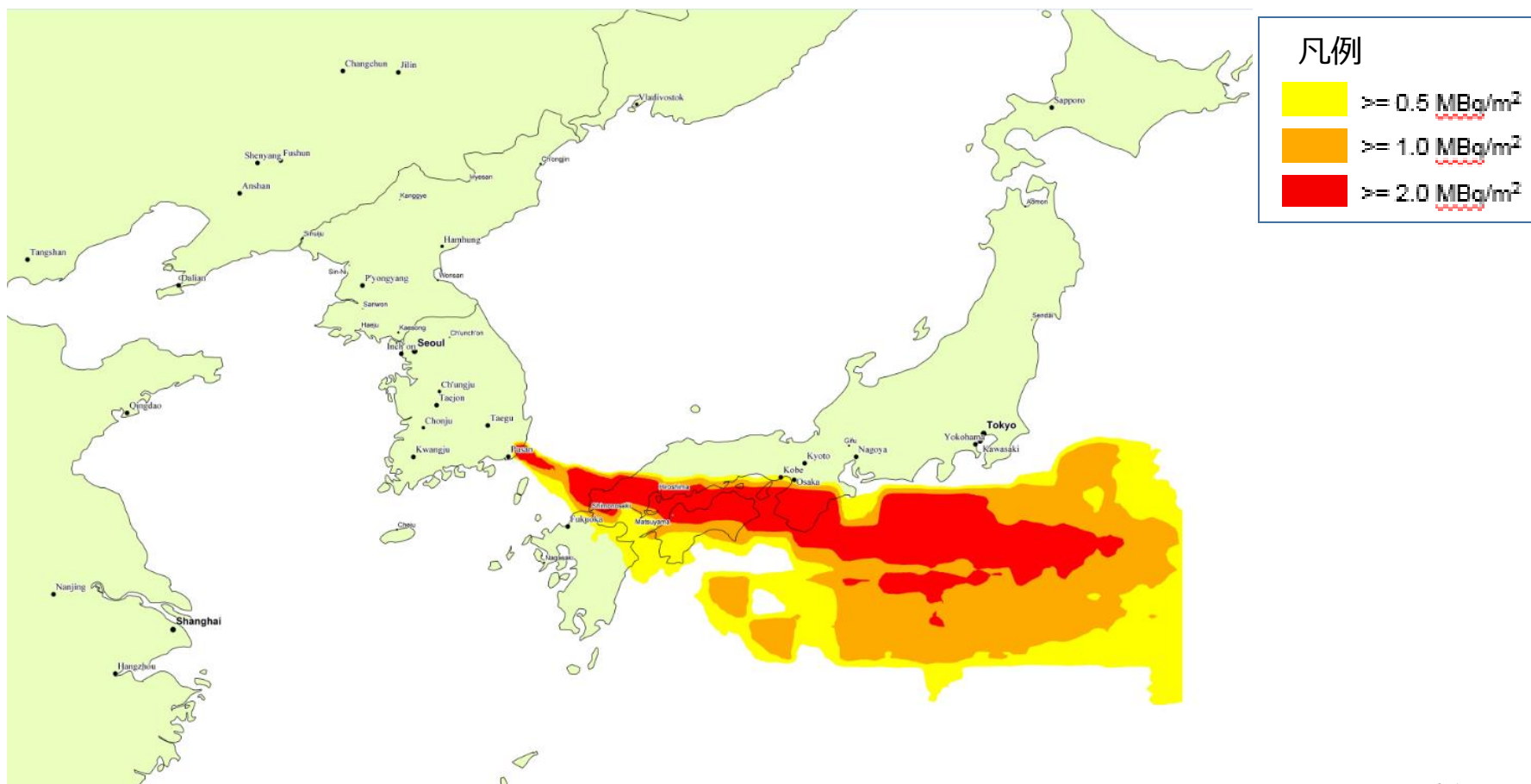
使用済み燃料 プール格納	低ケース	基本ケース	高ケース
高稠密	10% (218 PBq)	75% (1,633 PBq)	90% (1,959 PBq)
低稠密	0.5% (11 PBq)	3% (65 PBq)	5% (109 PBq)

(Ref: Author's calculation using ORIGEN2 code)

(Released fractions are based on USNRC, "COMSECY-13-0030 - Staff Evaluation and Recommendation for Japan Lessons-Learned Tier 3 Issue on Expedited Transfer of Spent Fuel," November 25, 2013)

古里3号機使用済み燃料プール火災の結果

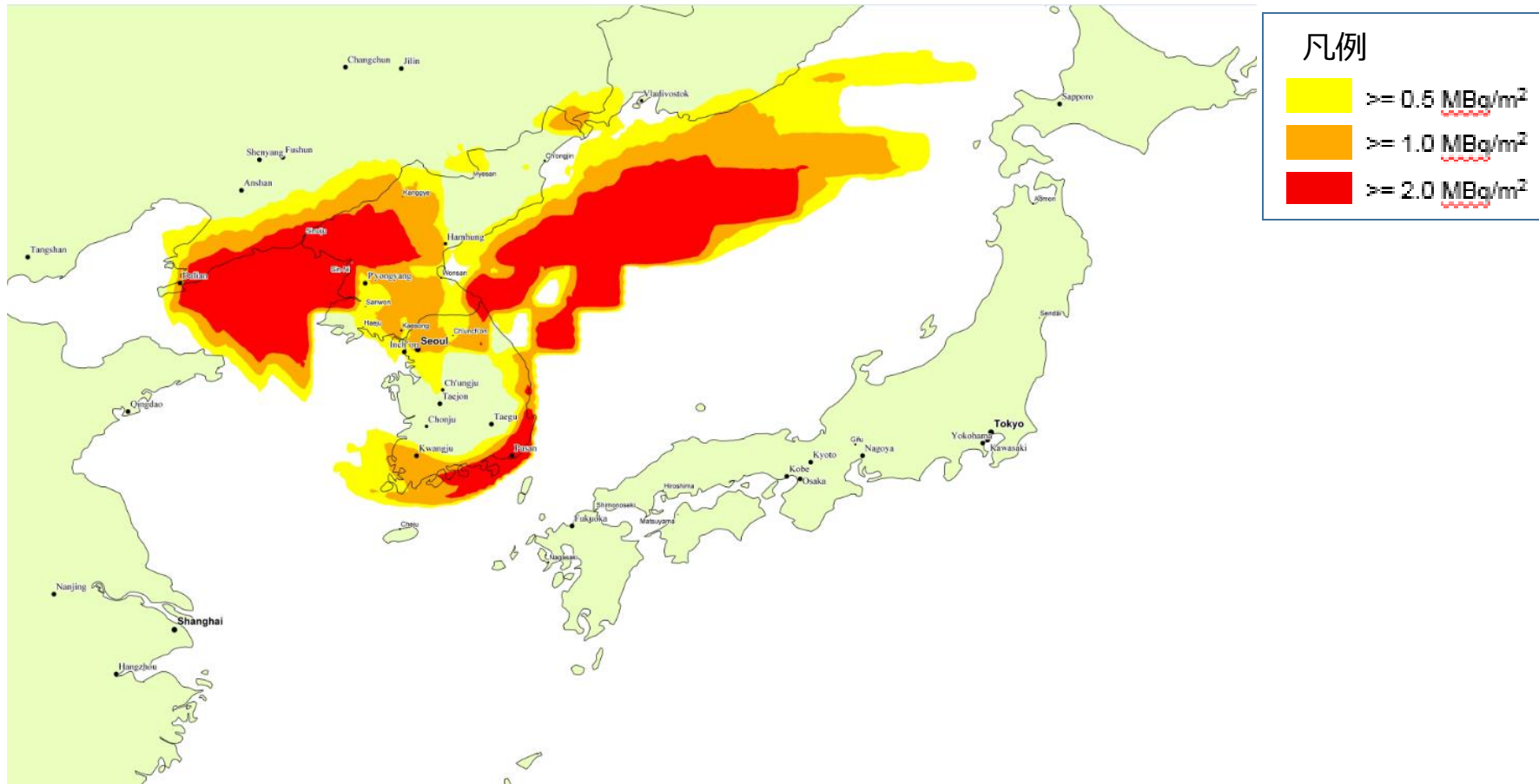
HYSPLITコードで2015年1月1日の気象データを用いて解析した結果(3日間、1,600 PBqのCs-137が放出されたと想定)



(Ref: Dr. Michael Schoeppner, Calculations in December 2016)

古里3号機使用済み燃料プール火災の結果(続き)

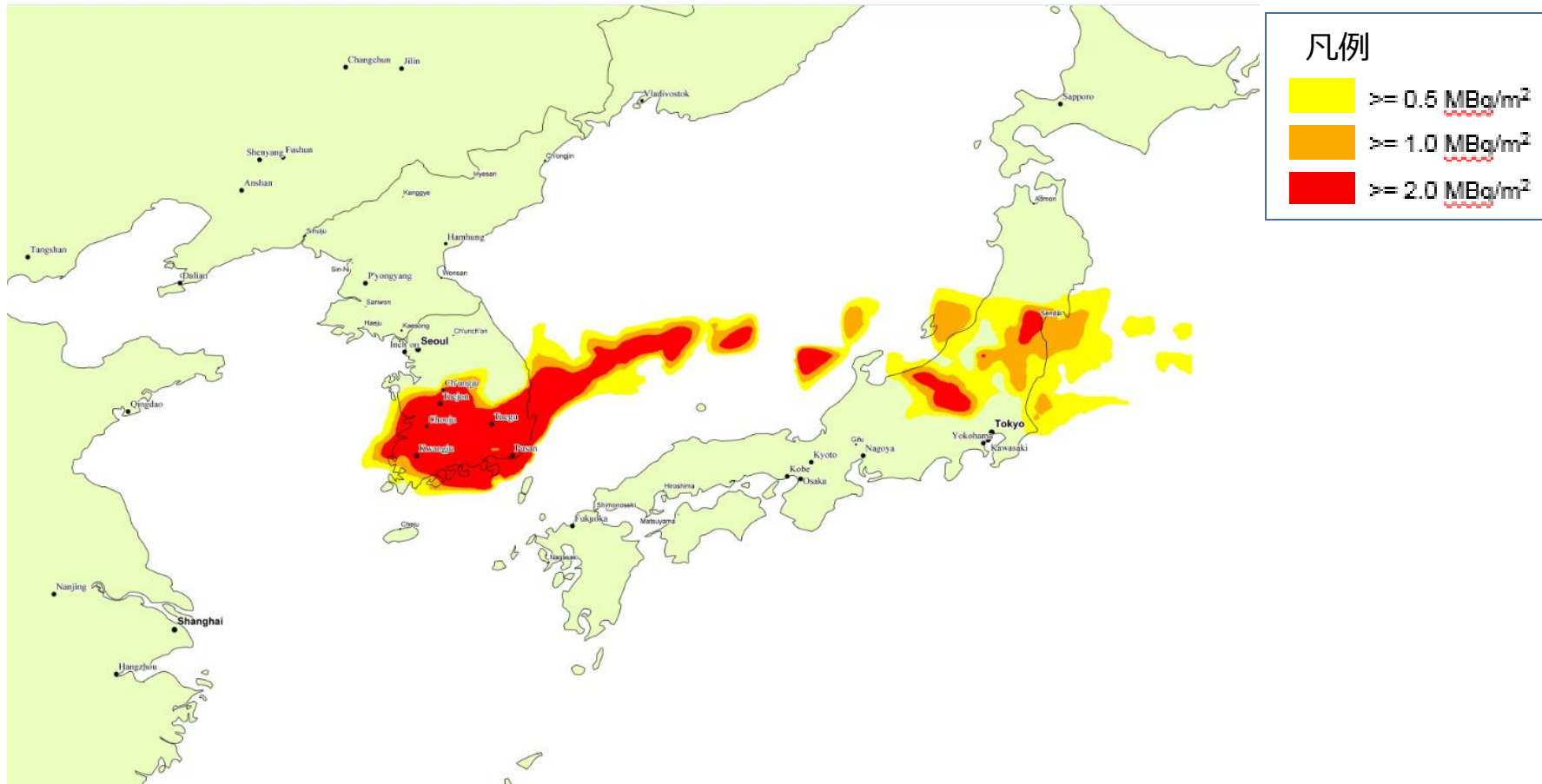
HYSPLITコードで2015年4月1日の気象データを用いて解析した結果(3日間、1,600 PBqのCs-137が放出されたと想定)



(Ref: Dr. Michael Schoepner, Calculations in December 2016)

古里3号機使用済み燃料プール火災の結果(続き)

HYSPLITコードで2015年9月1日の気象データを用いて解析した結果(3日間、1,600 PBqのCs-137が放出されたと想定)



古里3号機使用済み燃料プール火災のまとめ

HYSPLITコードで2015年の気象データを用いて解析した結果
(3日間、1,600 PBqのCs-137が放出されたと想定)

国	汚染地域 (km ²)		避難者数	
	平均	最大	平均	最大
<u>韓国</u> (100,210 km ²)				
避難地域	9,000	54,000	5,400,000	24,300,000
30年以上にわたる避難地域	6,000	45,000	3,300,000	19,000,000
<u>朝鮮</u>				
避難地域	5,000	64,000	1,100,000	13,400,000
30年以上にわたる避難地域	2,000	30,000	620,000	7,400,000
<u>日本</u>				
避難地域	27,000	67,000	7,900,000	28,300,000
30年以上にわたる避難地域	14,000	40,000	4,300,000	18,400,000
<u>中国</u>				
避難地域	2,000	28,000	700,000	8,700,000
30年以上にわたる避難地域	1,000	9,000	400,000	4,900,000

(Ref: Dr. Michael Schoeppner, Calculations in December 2016)

結論

- 古里3号機での使用済み燃料火災を仮想したところ、韓国の国土のおよそ半分がCs-137の濃度が1.0 MBq/m²以上に汚染され、およそ2400万人が移住を余儀なくされるだけでなく、事故時の気象条件によっては、周辺国にも大きな損害を与える
- 半分以上の汚染地域は除染が行われない限り、少なくとも30年は避難地域であり続ける

推奨

- 使用済み燃料は稠密貯蔵のプールではなく、オープン・ラックのプールで貯蔵する
 - それによりCs-137放出量を1/20に減らすことができる。
- 5年間のプール冷却後、使用済み燃料を乾式貯蔵キャスクに移す
 - 使用済み燃料の乾式貯蔵はプール貯蔵より、自然災害やテロリズム、破壊活動に対して安全である

乾式貯蔵の安全性は福島でも証明された

4号機プールの燃料ラック上のデブリ



(Ref: "Lessons Learned from the Fukushima Accident for Improving Safety and Security of U.S. Nuclear Plants: Phase 2," National Academy of Sciences, 2016, p.23)

津波後の福島第一原発の使用済み燃料キャスク



(Ref: <http://cryptome.org/eyeball/daiichi090911/daiichi090911.htm>)

Q & A

E-mail address:
jkang@nrdc.org