

<概要>

再処理によって抽出されたプルトニウムは、ウランと混合しMOX燃料として軽水炉で燃やすことができる。将来的には、高速増殖炉でこのプルトニウムを利用することにより、ウラン資源の利用効率を飛躍的に高めると期待されるが、実用化にはまだ時間がかかる。MOX燃料の軽水炉への利用（プルサーマル）は、既にフランス、ドイツなどで実施されてきており、わが国でも敦賀1号機や美浜1号機で先行照射試験が実施され、技術的には問題のないことが確認されており、九州電力玄海発電所などでプルサーマルが開始されている。

ここでは、MOX燃料の特性及び燃料製造時の課題について述べるとともに、わが国のプルサーマル計画について触れる。

<更新年月>

2010年10月

<本文>

1. はじめに

軽水炉にMOX燃料を利用するプルサーマルは、世界的に現時点で最も確実なプルトニウム利用方法であり、今後数十年にわたりプルトニウム利用の柱になると考えられている。

MOX燃料の軽水炉への利用は、1960年代から開始された。フランス、ドイツ、スイス、ベルギーにおいては、1980年代から利用が本格化し、2008年12月末で、全世界の軽水炉での使用実績は、燃料集合体で6,350体に達している（図1参照）。このうち、フランス、ドイツの実績は群を抜いている。また、この時点でMOX燃料を装荷している原子力発電所は、フランス22基、ドイツ15基、アメリカ7基、スイス3基、ベルギー3基などとなっており、わが国においては日本原電敦賀原子力発電所1号機で2体、関西電力美浜発電所1号機で4体の使用実績があり、また、軽水炉以外に型転換炉「ふげん」で770体を超える使用実績がある。

わが国では、原研（現日本原子力研究開発機構）JRR-2、NSRRを用いた基礎照射試験、海外GETR、ハルデン炉、Saxton炉を用いた確性照射試験に続き、1980年後半から敦賀1号機（BWR）及び美浜1号機（PWR）において少数体先行照射が実施され、その照射された燃料についてサイト及びホットラボにおいて詳細に検査、分析が行われ、MOX燃料の健全性が実証されている。

敦賀1号機においては、表1に示した仕様の燃料集合体2体が1986年7月から1990年1月までの3サイクルに装荷、照射され、集合体平均燃焼度約26.4GWd/tを達成した。その後、照射後試験が日本核燃料開発（株）及び動力炉・核燃料開発事業団（現日本原子力研究開発機構）大洗工学試験センターにおいて実施され、燃料の健全性が確認されるとともに、表2に示したMOX燃料の照射挙動に関するデータが取得されている。

また、美浜1号機においては、表3に示した仕様の燃料集合体4体が1988年4月から1991年12月までの3サイクルに装荷、照射され、集合体平均燃焼度約23.3GWd/tを達成した。その後、同様に照射後試験がニュークリア・デベロップメント（株）において実施され、燃料健全性が確認されるとともに、MOX燃料の照射挙動に関するデータが取得されている。

2. MOX燃料の特性

MOX燃料ではUO₂中に少量のPuO₂が添加されているが、その結晶構造はウラン燃料と同じ螢石型面心立方格子であり、ウラン原子の一部がプルトニウム原子に置き換わる形で固溶している。したがって、その物性はプルトニウムの含有量に応じて滑らかに変化する。

MOX燃料棒の照射下のふるまいは、基本的にはUO₂燃料棒と同じであるが、その核特性や物性の差から多少の違いも見られる。これらMOX燃料の物性（融点、熱伝導率、熱膨張率、クリープ特性など）及び燃料挙動（FPガス放出、スエリング、プルトニウムスポットなど）に関しては、ATOMICA「ウラン燃料とプルトニウム燃料の相違<04-09-01-04>」（<関連タイトル>参照）に記述があるので、ここでは省略する。

MOX燃料の損傷もUO₂燃料と同様、極めてわずかである。その破損機構については、MOX燃料の被覆管や燃料集合体構造がUO₂燃料と同じであることから、MOX燃料とUO₂燃料で特に異なる要因はないと考えられる。また、破損したMOX燃料のふるまいもUO₂燃料と同等であり、放出放射能レベルもUO₂燃料より悪くなることはなかったと報告されている。

3. 燃料製造方法の影響

MOX燃料では、PuO₂の含有にともなう物性変化とともにMOX燃料の製造方法に起因するペレット微細組織変化の影響について留意する必要がある。MOX燃料の製造においては、ウラン粉末とPuO₂粉末を機械的に混合した後に通常のウラン燃料と同じようにペレット成型、焼結されるので、この機械混合時に粉末の不均一性が生ずる。これは焼結後のペレットでもPuO₂の濃度が高い領域（プルトニウムスポット）として確認されている。このような領域では、周りの均一なマトリックス（母体）との核的特性の違いにより、核分裂が多く起こり、そこでの燃焼度が高くなり、例えばFPガス放出挙動が異なってくる。各MOX燃料メーカーは、粉末混合工程を工夫して均一性を向上させ、照射挙動等への影響が少ないペレットを製造している。

4. わが国のプルサーマル計画

1. はじめにの項でも述べたように、わが国ではこれまでに、敦賀1号機及び美浜1号機で先行照射試験を行い、プルサーマルに関して技術的に問題のないことを確認している。1997年2月4日、プルサーマルを早急に開始することが必要であるとする閣議了解が行われ、電力会社は1999年から順次プルサーマルを実施し、2010年までに累計で16～18基の軽水炉でプルサーマルを実施する具体的な計画を立てた。

この計画は、利用目的のないプルトニウムを持たないという国の方針のもと、全国で16～18基のプルサーマルをできる限り早期に実現することを大前提にして、各電力会社が立地地域の意見や、MOX燃料の製造スケジュール、海外からの輸送工程など最新の状況を踏まえて検討が行われた。その結果、2009年6月12日にこれまでの工程を見直して、「遅くともMOX燃料加工工場が操業開始する2015年度までに、全国で16～18基の原子炉でプルサーマルの導入を目指す」という新たな計画を立て、その実現に向けて引き続き業界を挙げて取り組んでいくこととなった（表4参照）。

2010年8月時点におけるプルサーマル計画の進捗状況を図2に示す。

このような取り組みから、2009年11月に九州電力玄海原子力発電所3号機、2010年3月に四国電力伊方発電所3号機及び2010年9月に東京電力福島第一原子力発電所3号機がプルサーマルによる発電を開始した。また、関西電力高浜発電所3号機が2010年12月に、中部電力浜岡発電所4号機が2011年1月にプルサーマルによる発電の開始を予定して

<関連タイトル>

[日本におけるプルトニウムの軽水炉での利用状況 \(02-08-04-03\)](#)

[海外におけるプルトニウムの軽水炉での利用状況 \(02-08-04-04\)](#)

[プルトニウム混合転換技術 \(04-09-01-03\)](#)

[ウラン燃料とプルトニウム燃料の相違 \(04-09-01-04\)](#)

[日本のプルトニウム燃料製造施設と生産量 \(04-09-01-05\)](#)

[海外のプルトニウム燃料製造施設 \(04-09-01-06\)](#)

[混合酸化物（MOX）燃料の製造加工工程 \(04-09-01-07\)](#)

[日本のプルトニウム利用計画 \(04-09-02-11\)](#)

<参考文献>

(1) 原子力安全協会（編集・発行）：実務テキストシリーズ No.3、軽水炉燃料のふるまい 第4版（平成15年7月 第2刷）p.297-306

(2) 市川達生ほか：我が国におけるMOX燃料の照射実証及び照射後試験、原子力学会誌、Vol.39、No.2（1997）

(3) 日本原子力産業会議（編集・発行）：原子力年鑑 1998/1999年版（1998年12月）p.190-195

- (4) 電気事業連合会（編集・発行）：原子力Q & A、コンセンサス 1998-99、p.20-21
- (5) 通産省資源エネルギー庁公益事業部（編集）：1998原子力発電 -その必要性和安全性-、日本原子力文化振興財団（1998年3月）p.83-86
- (6) 原子力委員会：電気事業者等により公表されたプルトニウム利用計画における利用目的の妥当性について（案）第17回原子力委員会資料第1号（平成22年3月23日）、
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2010/siryo17/siryo1.pdf>
- (7) 東京電力株式会社プレスリリース 2010年：定期検査中の福島第一原子力発電所3号機の発電開始について（平成22年9月23日）、<http://www.tepco.co.jp/cc/press/10092301-j.html>
- (8) 電気事業連合会 でんきの情報広場：プルサーマルの現状
- (9) 電気事業連合会 でんきの情報広場：電事連会長 定例会見要旨 プルサーマル計画の見直しについて（資料1）、2009年6月12日、
http://www.fepec.or.jp/news/_icsFiles/afieldfile/2009/06/12/kaiken_0612.pdf
- (10) 資源エネルギー庁：プルサーマルのしくみと安全性 プルサーマル計画の進捗
- (11) 電気事業連合会：「原子力・エネルギー図面集2010」第7章 [原子燃料サイクル]7-24（2010年3月23日）
-

表1 敦賀1号機先行照射MOX燃料
集合体の基本仕様

項目	MOX燃料	新型8×8燃料
燃料集合体		
配列	8×8	同左
燃料棒本数(本)	62	同左
UO ₂ 燃料棒	38	62
MOX燃料棒	24	—
燃料棒		
被覆管外径(mm)	約12.3	同左
被覆管肉厚(mm)	約0.86	同左
被覆管材料	ジルカロイ-2	同左
ペレット 外径(mm)	約10.3	同左
ペレット 内径(mm)		
UO ₂ 燃料棒	0(中実)	同左
MOX燃料棒	約3.6	—
ペレット 密度(%TD)	約95	同左
ペレット 材		
UO ₂ 燃料棒	UO ₂ , UO ₂ -Gd ₂ O ₃	同左
MOX燃料棒	UO ₂ -PuO ₂	—
ギャップ幅(mm)	約0.24	同左
燃料有効長(m)	約3.66	同左
初期He 加圧量(気圧)		
UO ₂ 燃料棒	約3	同左
MOX燃料棒	大気圧	—
ウォータロッド		
外径(mm)	約15.0	同左
本数(本)	2	同左
支持格子		
型式	格子型	同左

[出典] 原子力安全協会(編集・発行):実務テキストシリーズ No.3、
軽水炉燃料のふるまい 第4版 第2刷(平成15年7月) p.299

表2 敦賀1号機先行照射燃料照射後試験、
主要項目

非破壊試験	破壊試験
集合体表面熱中性子測定	パンクチャー試験
集合体表面 γ 線測定	被覆管金相試験
外観観察	被覆管内外面観察
ECT欠陥探傷試験	ペレット金相試験
伸び測定	ペレット径方向SXMA(EPMA)
外径測定	分析-Pu, Xe-
外面酸化膜厚さ測定	ペレット径方向燃焼度分析
軸方向 γ 線泉強度分布測定	ペレット密度測定
プレナムスペクトロメトリー	ペレット融点測定
	ペレット熱伝導度測定
	ペレットO/M比測定
	ペレット燃焼度分析

[出典] 原子力安全協会(編集・発行):実務テキストシリーズ No.3、
軽水炉燃料のふるまい 第4版 第2刷(平成15年7月) p.299

表3 美浜1号機先行照射MOX燃料集合体の基本仕様

項目	美浜1号機燃料集合体仕様		
	MOX燃料集合体		UO ₂ 燃料集合体
集合体	MOX燃料集合体		UO ₂ 燃料集合体
燃料棒配列	14×14		14×14
燃料棒装荷本数	179本		179本
全長	3465mm		3465mm
支持格子数	6個		6個
燃料棒			
製造者	旧動燃	WH社	三菱原子燃料
全長	約 3.23m	約 3.23m	約 3.21 m
燃料有効長	約 3.04m	約 3.04m	約 3.05m
ペレット			
材質	ウランプルトニウム混合二酸化物	ウランプルトニウム混合二酸化物	二酸化ウラン又は ガドリニア入り二酸化ウラン
プルトニウム含有率*	集合体平均 約 3.8wt%	集合体平均 約 3.8wt%	—
核分裂性Pu富化度**	集合体平均 約 3.1wt%	集合体平均 約 3.1wt%	—
直径	約 9.29mm	約 9.27mm	約 9.29mm
高さ	約 12.5mm	約 15.2mm	約 15.2mm
密度	約 95%TD	約 92%TD	約 95%TD
被覆管			
材質	ジルカロイ4	ジルカロイ4	シルカロイ4
外径	約 10.72mm	約 10.72mm	約 10.72mm
肉厚	約 0.62mm	約 0.62mm	約 0.62mm

*:プルトニウム含有率

**：核分裂性プルトニウム富化度

$$\frac{\text{PuO}_2}{\text{PuO}_2 + \text{UO}_2}$$

$$\frac{{}^{239}\text{Pu} + {}^{241}\text{Pu}}{\text{U} + \text{Pu}}$$

表4 わが国のプルサーマル計画

電力	導入基数	導入場所	備考
北海道	1基	泊発電所3号機	安全協定に基づく事前了解済 原子炉設置変更許可申請中
東北	1基	女川原子力発電所3号機	原子炉設置変更許可申請中
東京	3～4基	東京電力の原子力発電所の3～4基	立地地域の信頼回復に努めることを基本とする(注1)
中部	1基	浜岡原子力発電所4号機	2010年度から導入予定
北陸	1基	志賀原子力発電所	地域の信頼・安心の獲得に取り組み中
関西	3～4基	高浜発電所3、4号機 大飯発電所1～2基	高浜発電所については2010年度から導入予定
中国	1基	島根原子力発電所2号機	安全協定に基づく事前了解済 原子炉設置変更許可取得済
四国	1基	伊方発電所3号機	2010年度までに導入予定(注2)
九州	1基	玄海原子力発電所3号機	2010年度までに導入予定(注3)
日本原電	2基	敦賀発電所2号機 東海第二発電所	地域の理解を得られるよう取り組んでいく
電源開発	1基	大間原子力発電所	2013年度から導入予定
合計	16～18基	-	-

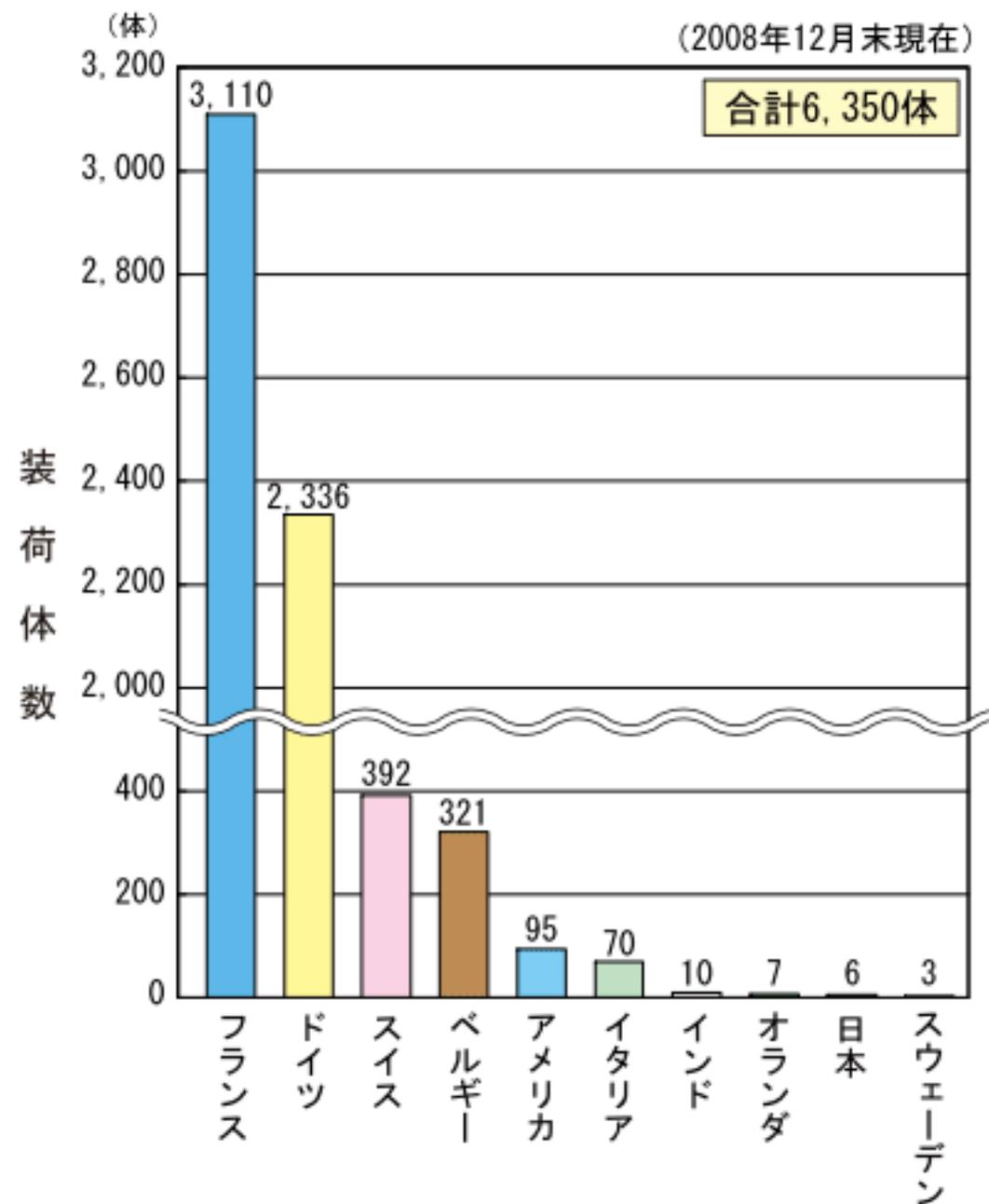
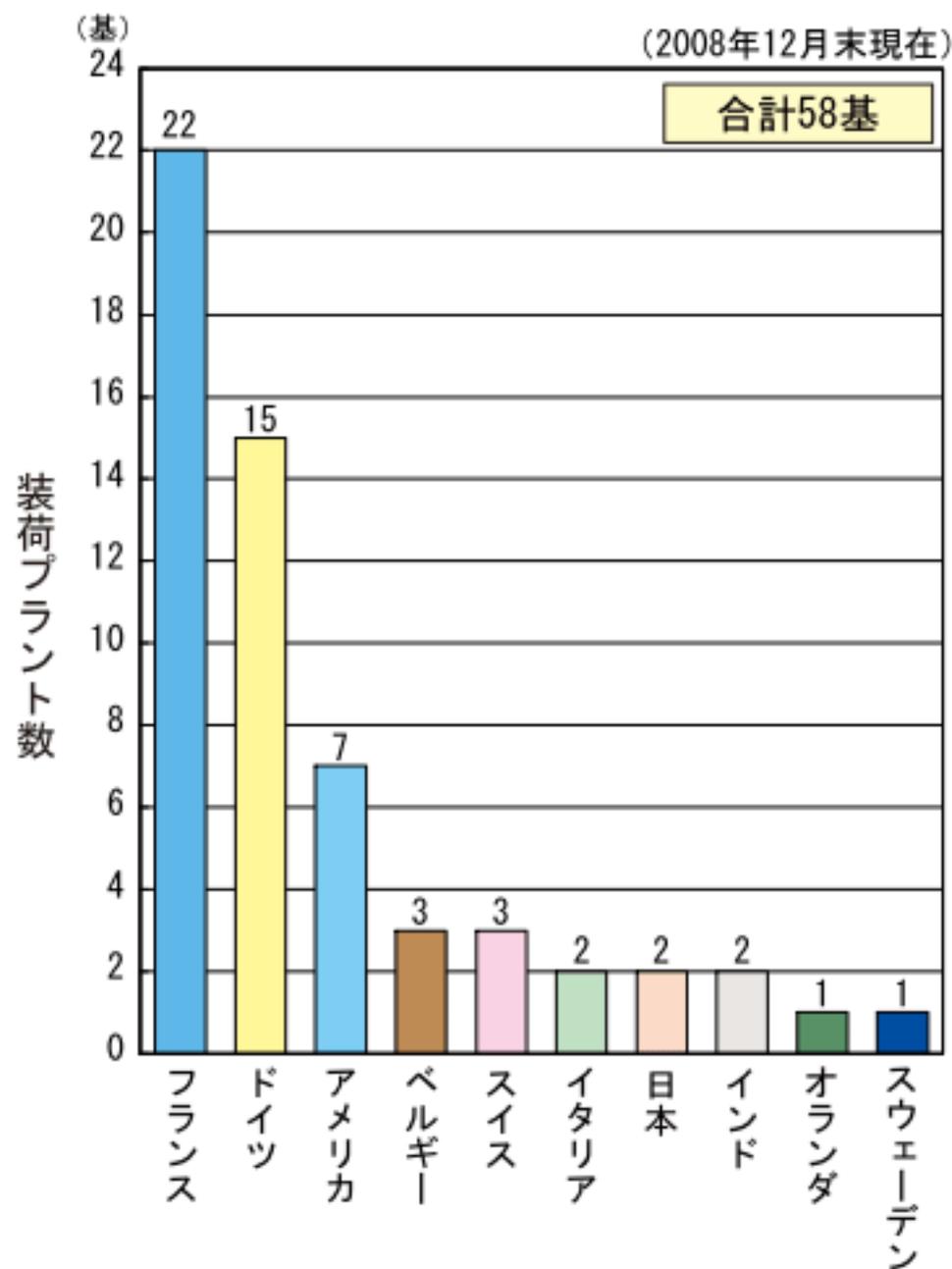
注1：2010年9月に福島第一原子力発電所3号機がプルサーマルによる発電を開始、
同年10月より営業運転の開始を予定

注2：2010年3月に伊方発電所3号機がプルサーマルによる発電を開始、同年3月より営業運転を開始

注3：2009年11月に玄海原子力発電所3号機がプルサーマルによる発電を開始、
同年12月より営業運転を開始

下記出所をもとに、2010年10月末における進捗状況(プルサーマルによる発電の開始)を反映して作成した。

[出所] 電気事業連合会 でんきの情報広場：電事連会長定例会見要旨 プルサーマル計画の見直しについて(資料1)、
2009年6月12日、http://www.fepc.or.jp/about_us/pr/kaiken/_icsFiles/afieldfile/2009/06/12/kaiken_0612.pdf



(注) 日本では軽水炉以外にATR「ふげん」で772体の使用実績がある(2003年3月)
 フランス(21プラント)、ドイツ(10プラント)、スイス(3プラント)、ベルギー(2プラント)、アメリカ(1プラント)では、2008年12月末現在もMOX燃料を使用中である

図1 世界の軽水炉におけるMOX燃料の使用実績

[出所] 電気事業連合会:「原子力・エネルギー図面集2010」第7章 [原子燃料サイクル]7-24 (2010年3月23日)、
<http://www.fepec.or.jp/library/publication/pamphlet/nuclear/zumenshu/pdf/all07.pdf>

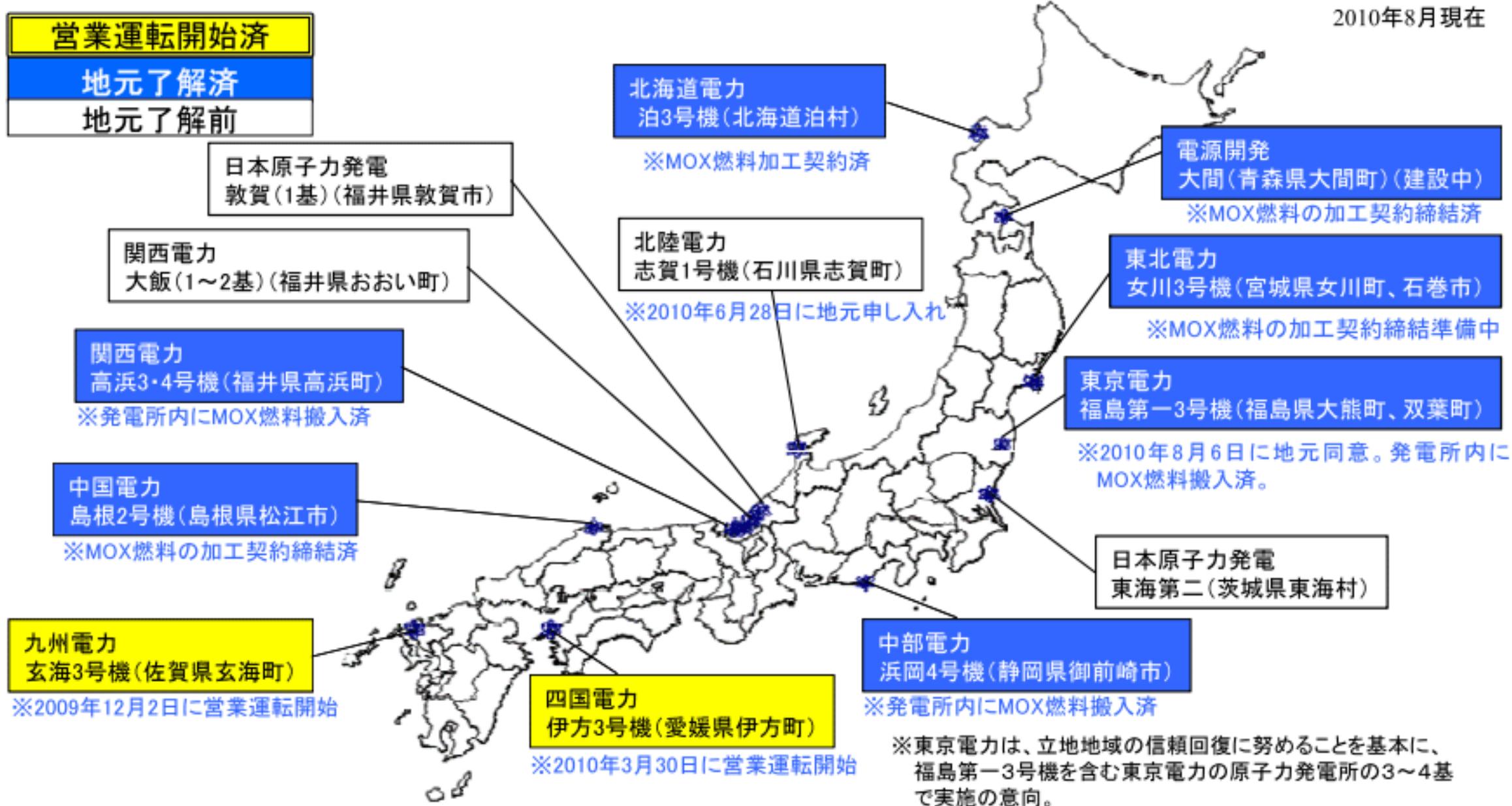


図2 プルサーマル計画の進捗状況