

<概要>

電力需要は1日周期でも1週間周期でも変動し、需要に合わせた**負荷追従運転**は経済性向上のために必要な運転モードである。全発電設備の中で、**原子力発電**の割合が高いフランスでは特にこの要求が高く、研究の段階を経て、1982年から負荷追従運転は商用運転モードに取り入れられている。また米国では、**PWR**、**BWR**の両炉型で、負荷追従運転の試験／デモンストレーションが行われた。

出力調整過程で、燃料の健全性にもっとも厳しい影響を与える**出力急昇試験**がハルデン計画、インターランプ計画、オーバーランプ計画、デモランプ1、2計画、スーパーランプ計画等で行われ、また出力サイクル試験が**ハルデン計画**で行われた。

<更新年月>

1998年05月 （本データは原則として更新対象外とします。）

<本文>

米国の一部の電力会社及びヨーロッパの一部の国で、発電設備の中で原子力の割合が高い処は経済的な発電を行うために、負荷追従運転が必要になってきた。フランスではその割合が特に高く、試験研究の段階を経て、現在は負荷追従が商用運転に取り入れられている。また、米国では、**PWR**、**BWR**の両炉型で、負荷追従運転の試験／デモンストレーションが行われたが、商用運転として一般化するまでには至っていない。

出力変動の方法は、**PWR**ではホウ素濃度の制御であるが、**BWR**では冷却材流量制御のみと冷却材流量と**制御棒**の両者を制御する場合がある。出力変動に伴う技術的な問題のうちで**炉物理**、炉工学の問題は文献（1）に説明されている。また、燃料の健全性に対しては、出力急昇が最も大きな影響を与えるので、負荷追従の実用化に先だって、ハルデン計画を始めとする多くの国際共同研究で（後述）、燃料の健全性に及ぼす出力急昇の影響が調べられた。

フランスでは全発電量のうちで原子力発電の割合は、1984年で55%、1986年には70%、1990年には75%に達している。このため、電力需要に応じた負荷追従運転が必要になる。

負荷追従試験は、1979年から一部の**原子炉**で行われ、1982年6月には負荷追従に、1984年2月には周波数制御、1985年8月には両者を同時に行う運転に認可が出された。出力変動モードとしては、

遅い変動 : 12（定格出力）-3（降下）-6（低出力）-3（上昇）（数字は時間）

中程度の変動 : 出力低下及び上昇速度は共に定格出力の2%/分、

速い変動 : 出力低下及び上昇速度は共に定格出力の5%/分、

があるが、**EDF（フランス電力公社）**では、最も厳しい速い変動についても1985年から採用している。

図1は、フランスにおける負荷追従と周波数調整運転の回数と**燃料破損**の関係を示したものである。燃料破損率は負荷追従を開始した翌年の1983年をピークとして年と共に減っている。また、破損を起こした燃料の破損時期と負荷追従サイクルの回数との関係が見られなかったことから、負荷追従に採用している出力変動モードは燃料の健全性を損なわないと結論している。

米国での負荷追従試験は主に1日周期の出力変動パターンであるが、1週間周期の試験例も少数ある。**PWR**では7基の原子炉でデモンストレーションが行われたが、最大では200回サイクル（1日周期）の運転例がある。**BWR**では5基での試験／デモンストレーション及び4基での商用運転例がある。**表1**及び**表2**はそれぞれ米国における**PWR**および**BWR**での負荷追従運転例である。

負荷追従運転では、Xe変動やホウ素制御（PWR）の問題もあるが、最大の問題は出力上昇時の燃料破損である。出力急昇に関する主な試験研究としては以下のものがある。いずれの試験も国際共同研究で、出力急昇にともなう燃料の健全性を調べたものであり、これらの試験により、燃料の健全性が保たれる出力上昇条件及び燃料破損機構が調べられた。

(1) ハルデン計画

1967年から始まったノルウェー、ハルデンの重水実験炉を用いたOECD/NEAの共同研究計画で、出力調整に関しては1970年代の後半から80年代に燃料の急昇試験及び出力サイクル試験が複数回行われた。

以下の計画は、いずれもスウェーデン、ストドビックのR2実験炉を用いて行われた。

(2) インターランプ計画（1975～1979）

燃焼度が23MWd/kg UのBWR標準燃料に対して、40W/cm/minの出力上昇時の挙動を調べた。

(3) オーバーランプ計画（1977～1980）

燃焼度が31MWd/kg U迄のPWR燃料に対して、0.5～100W/cm/minの出力上昇時の挙動を調べた。

(4) デモランプ 1、2 計画（1979～1982）

穴あきペレットやNb添加等の軽水炉用改良燃料に対して、ステップ状または40～200W/cm/minで出力を上げ、破損限界及び破損機構を調べた。

(5) スーパーランプ計画（1980～1983）

30～45MWd/kg Uの高燃焼軽水炉用燃料に対して、ステップまたはこれとランプの組み合わせで出力を上昇させ、破損しきい値と破損機構を調べた。

出力急昇時の燃料破損しきい値は、最高出力、出力急昇速度及び幅、燃焼度、燃料設計等が関係するので、燃料履歴や運転条件で異なってくる。これらの試験では、燃料の健全性が保たれる最高線出力は400W/cm付近との結果が得られている。

<関連タイトル>

[原子炉の出力変動時の燃料挙動に関する研究 \(06-01-01-02\)](#)

<参考文献>

- (1) 若林二郎ほか：原子力発電所の負荷追従運転、日本原子力学会誌、28，p913（1986）
 - (2) A.Dumont, P.Bournay: FRAGEMA Fuel Performance Under Load Follow and Frequency Control Operation in EDF Plants, ANS Int. Topical Meet. on LWR Fuel Performance, Williamsburg, USA, 17-20 April, 1988.
 - (3) L.Goldstein, K.D.Sheppard: A Survey of Load Follow Experience in U.S. Light Water Reactors, ANS Int. Topical Mtg. on LWR Fuel Performance, Williamsburg, USA, 17-20 April 1988.
 - (4) E.Kolstad, et. al.: In-Reactor Thermo/Mechanical Measurements on LWR Fuel Rods in the High Burn-up Range, IAEA Mtg. on Fuel Performance at High Burn-Up for Water Reactor, Nyköping, Sweden, 5-8 June 1990.
 - (5) D.Franklin et. al.: A Utility Perspective on LWR Fuel Performance, ANS Int. Topical Mtg. on LWR Fuel Performance, Williamsburg, USA, 17-20 April 1988.
-

表1 米国PWRの主な負荷追従運転例

原子炉名	平均線 出力 W/cm (kW/ft.)	燃料 サイクル No.	運転期間	負荷追従 形式	負荷追従 回数	低出力時 出力の 対する 割合(%)	サイクル 形式 (時間変化)
Point Beach 1	190 (5.79)	1	12/70-9/72	1日サイクル	190	65	17-2-3-2
		2	3/73-4/74	1日サイクル	160	40	17-2-3-2
		3	6/74-11/75	1日サイクル	90	50	17-2-3-2
		4	1/76-8/76	1日サイクル	50	45	17-2-3-2
		5	11/76-8/77	1日サイクル	70	70	17-2-3-2
		7	10/78-10/79	1日サイクル	10	50	15-4-1-4
		12	4/84-4/85	1日サイクル	10	70	16-3-2-3
Point Beach 2	190 (5.79)	1	4/73-10/74	1日サイクル	200	45	17-2-3-2
		2	12/74-2/76	1日サイクル	180	40	17-2-3-2
		3	3/76-3/77	1日サイクル	160	40	17-3-2-2
		4	4/77-3/78	1日サイクル	80	45	18-2-2-2
		5	4/78-3/79	1日サイクル	10	60	15-4-1-4
		11	11/84-9/85	1日サイクル	20	65	13-4-3-4 and 16-3-2-3
Prairie Island 1	206 (6.29)	1	12/73-3/76	1日サイクル	20	50	—
		2	5/76-3/77	1日サイクル	10	50	—
		3	5/77-3/78	1日サイクル	20	50	—
		4	4/78-4/79	1日サイクル	40	40	14-3-4-3
		8	12/82-12/83	1日サイクル	10	50	13-4-3-4
Prairie Island 2	206 (6.29)	1	12/74-10/76	1日サイクル	80	50	—
		2	12/76-11/77	1日サイクル	15	50	—
		3	12/77-11/78	1日サイクル	60	40	11-3-7-3 and 15-3-3-3
		6	4/81-6/82	1日サイクル	10	65	12-5-2-5
		7	7/82-8/83	1日サイクル	10	50	14-4-2-4
Zion 1	220 (6.70)	2	6/76-9/77	1週サイクル	15	50	4-1-1-1
D. C. Cook 1	220 (6.70)	2	2/77-4/78	1週サイクル	25	40	3-1-1-2- 4-1-1-1
Rancho Seco	200 (6.11)	1	11/74-8/77	1日サイクル	15	30	15-2-4-3- 12-4-4-4
		2	11/77-11/78	1日サイクル	15	50	16-2-4-2 ↑↑↑↑ *出力増 高出力減少時間 出力増時間 出力増時間 (単位は時間)

※ 高出力：通常は定格出力

[出典] L. Goldstein, K. D. Sheppard; A Survey of Load Follow Experience in U. S. Light Water Reactors, ANS Int. Topical Mtg. on LWR Fuel Performance, Williamsburg, USA, 17-20 April 1988.

表2 米国BWRの主な負荷追従運転例

原子炉名及び形式	熱出力 (MWt)	実施年	燃料形式	負荷追従形式	運転方法 F:冷却材流量調整 R:制御棒操作	ならし運転 の有無
試験及びデモンストレーション						
Duane Arnold-BWR 4	1593	1974	7×7R	1日サイクル	F, R	No
Brunswick-1-BWR 4	2436	1978	8×8	1日サイクル	F, R	Yes
Browns Ferry 3	3440	1979	8×8	1日サイクル	F	No
-BWR 4					F, R	No
Dresden 2-BWR 3	2527	1975	7×7	EGC※	F	No
Quad Cities 2-BWR 3	2511	1979	8×8, 8×8R	EGC	F	No
商用負荷追従実験						
Monticello-BWR 3	1670	1979	8×8, 8×8R	1日サイクル	F	No
		1982	8×8, 8×8R, RP	1日サイクル	F	No
Dresden 2-BWR 3	2527	1981	8×8, 8×8R, RP	1日サイクル	F	No
Dresden 3-BWR 3	2527	1981	8×8, 8×8R, RP	1日サイクル	F	No
Quad Cities 2-BWR 3	2511	1982	8×8, 8×8R, RP	1日サイクル他	F	No

※ 出力調整装置による制御

[出典] L. Goldstein, K. D. Sheppard; A Survey of Load Follow Experience in U. S. Light Water Reactors, ANS Int. Topical Mtg. on LWR Fuel Performance, Williamsburg, USA, 17-20 April 1988.

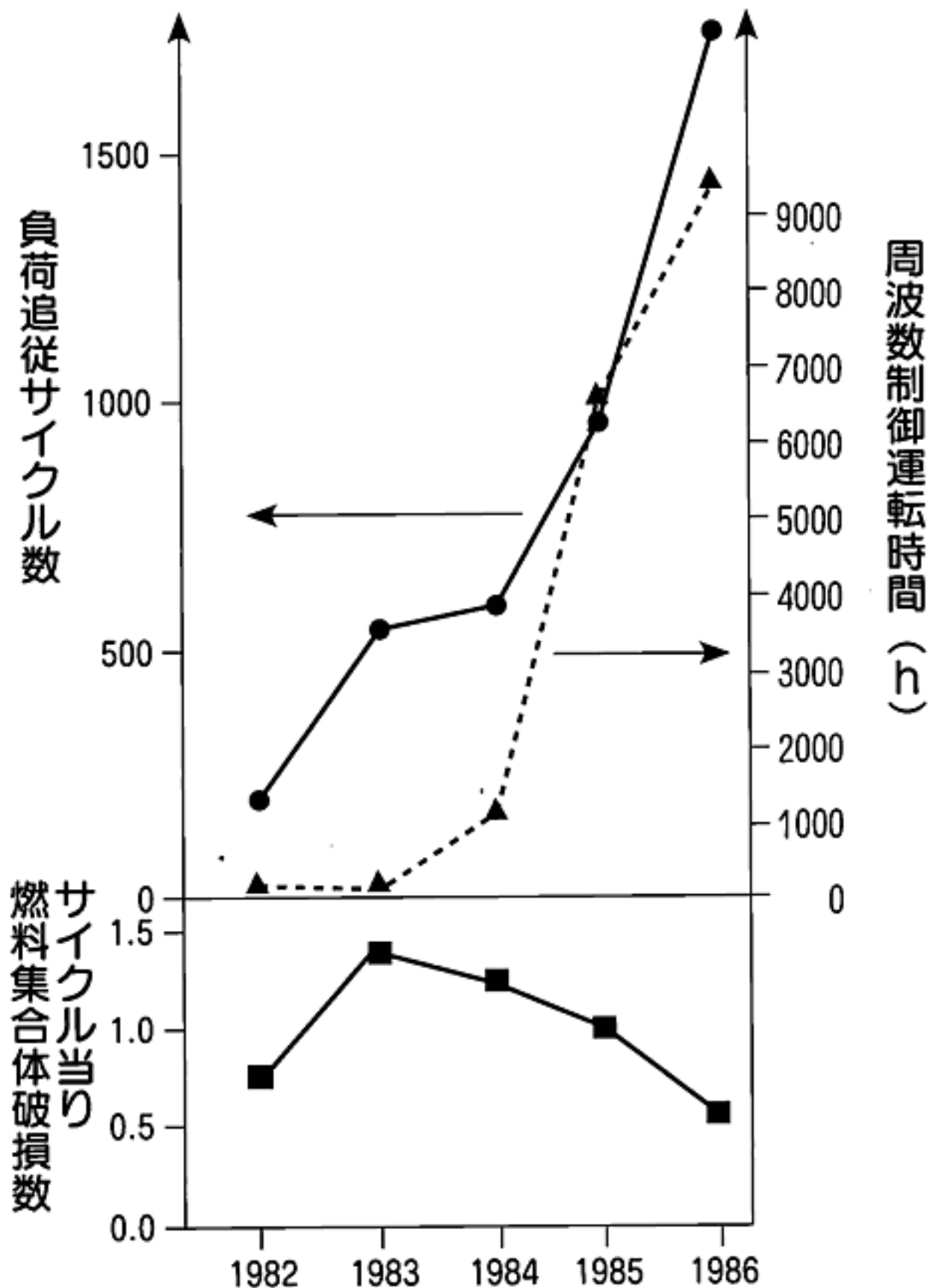


図1 フランスの原子力発電所における負荷追従サイクル数、周波数制御運転時間、燃料破損数（サイクル平均）の年次変化

〔出典〕 A. Dumont, P. Bournay: FRAGEMA Fuel Performance under Load Follow and Frequency Control Operation in EDF Plants, ANS Int. Topical Mtg. on LWR Fuel Performance, Williamsburg, USA, 17-20 April 1988.