

<文献紹介>

新発電システムの比較研究と評価 (要約)

(Comparative Study and Evaluation of Advanced
Cycle Systems (EPRI AF-664))

内 山 洋 司

1. 研究目的

今日、数多くの新エネルギー技術が、従来の発電技術の補完あるいは代替技術として提案されている。これらの新発電方式については、運転特性、費用、開発課題等に対する予測を基礎として様々な機関により広範囲に評価研究されている。

本研究は、電気事業にとって将来重要と考えられる各種新発電方式を、技術的、経済的な側面から均等化された項目によって解析、評価している。本研究の目的は、次のように要約される。

(1) 新発電方式の数量化し難い事柄、すなわち発電原価では直接表わし難い事項に対する評価法を開発する。

(2) 新発電方式の数量化し難い事柄と資本費、効率のような数量化できる量との間の利益のトレード・オフを表わし比較方法を開発する。

(3) ECAS (Energy Conversion Alternatives Study) の方法や基準を用いて、ECAS プログラムにはないが EPRI が関心をもついくつかの他の発電方式について、費用、性能を調査しその研究開発プログラムを作成する。

2. 評価対象となった発電方式

各新発電方式は、Phase 1, 2, 3 の3種類の Phase により評価された。Phase 1 では、ECAS Task I の発電方式の外に石炭燃料熱電子発電、石油及びウランを燃料とする方式を含めて計 21 種類の発電方式が検討された。Phase 2 では、Phase 1 の中から低カロリーガス水冷複合ガスタービンと流動層蒸気発電が選ばれ、詳細な概念設計が行われた (比較評価は行われていない)。Phase 3 では EPRI により Phase 1 から、3 種類の代表的な新発電方式が選ばれ、4 種類の在来型発電方式と合わせて比較検討された。

評価対象となった発電方式を表で示すと表1のようになる。

3. 評価手法

新発電方式が将来電気事業や国家にとってどれだけの利益をもたらすかを評価するため、次に示す3つの評価手法が均等化された技術的、経済的仮定を基に開発された。

開発された手法は、「均等発電原価」、「直接加重法」、「純現在価値法」の三つで、その関係を表わす構成図は図1に示すことができる。

表 1. 比較研究した発電方式

	発電方式	使用燃料	Phase 1	Phase 2	Phase 3	ECAS
開放サイクル	再熱ガスタービン	高カロリーガス*	○			○
	"	石油	○			○
	複合サイクルガスタービン・空冷	低カロリーガス*	○			○
	" ・水冷	"	○	○	●	○
"	"	S L F**	○			○
密閉サイクル	新型蒸気, 流動層	石炭	○	○	●	○
	" , 加圧流動層	"				○
	" , 在来炉	石油	○			
	" , 高温ガス炉HTGR	原子力	○			
	" , 液体金属増殖炉LMFBR	"	○			
	ヘリウム, ガスタービン・流動層	石炭	○			○
	" , 高温ガス炉HTGR	原子力	○			
超臨界圧炭酸ガスタービン	石炭	○			○	
金属蒸気ガスタービン・流動層	"	○			○	
直接発電	開放型MHD	"	○		●	○
	密閉サイクルMHD・希ガス, 在来炉	"	○			○
	" ・液体金属, 流動層	"	○			○
	熱電子発電・トッピング・蒸気, 在来炉	"	○			○
	低温燃料電池 水素 off-site	水素*	○			○
" 水素 on-site	石油	○				
在来方式	蒸気サイクル・排ガスクラバー付・在来炉	石炭	○		⊗	○
	" ・軽水炉LWR	原子力			⊗	
	ガスタービン・空冷・1,093°C	石油/SLF**			⊗	
	複合サイクルガスタービン・空冷・1,093°C	"			⊗	
ガスタービン	高カロリーガス*	○			○	

* 石炭から製造 ** 液化石炭

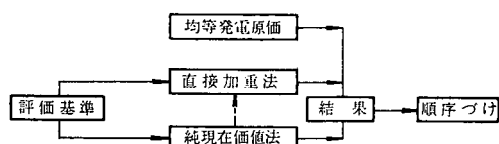


図 1. 評価手法の構成図

(1) 均等発電原価 (Levelized Cost of Electricity)

24 種類の各発電方式に対し 30 年の寿命期間に発電される電力の均等発電原価が計算され比較された。発電原価は各発電方式の概念設計を基に、建設費、燃料価格、運転保守費を均等化された技術的、経済的仮定より計算することで求められた。

(2) 直接加重法 (Direct Weighting Method)

21 種類の発電方式のそれぞれについて、電気事業者の立場から見て重要ではあるが数量化し難い事柄 (Intangibles) を優劣度 (Figure of Merit) により評価する。数量化し難い事柄とは、完全には定量化できない事柄であり、発電原価や市場に大きな影響を及ぼすもので表 2 に示されるような事柄である。

(3) 純現在価値法

この方法により、各発電方式の開発により得られる利益を求めることで各新発電方式がより詳細に比較評価されている。ここで求められる純現在価値とは、建設費や発電費用等が在来型発電方式に比べ安くなるため生じる節約費用か

表 2. 数量化し難い事項

1. 必要な研究開発費	14. 製造の難易度
2. 必要な研究開発期間	15. プラントの安全性
3. 開発成功の確率	16. 他のシステムへの依存性
4. 発電所の建設費	17. 各種燃料に対する適応性
5. 運転・補修の難易度	18. 寿命
6. 電気的運転特性	19. 建設場所の柔軟性
7. 発電所効率	20. 排出物の取扱・廃棄
8. 負荷追従性	21. プラントの建設期間
9. 部分負荷率	22. ユニットの大きさ
10. 最小負荷率	23. 副産物
11. 強制停止率	24. 環境保全
12. 計画停止率	25. 燃料・添加物の入手難易度
13. 建設資材入手の難易度	26. 起動電力

ら開発費用を差し引き、それを現在価値に換算したものである。この手法は実際には、次に示す4種類の異った方法からなっている。

① 電源構成 (Generation Phase Diagram)

新発電方式の各発電原価を「均等発電原価法」に比べより詳細な概念設計により計算し、明らかに経済的に有利な新方式とそうでないものとに選別する方法。

② 発電量の拡張 (Generation Expansion)

最適発電計画法を用いており、これによって新発電方式に対する将来の市場占有率と年間設備利用率が計算される。

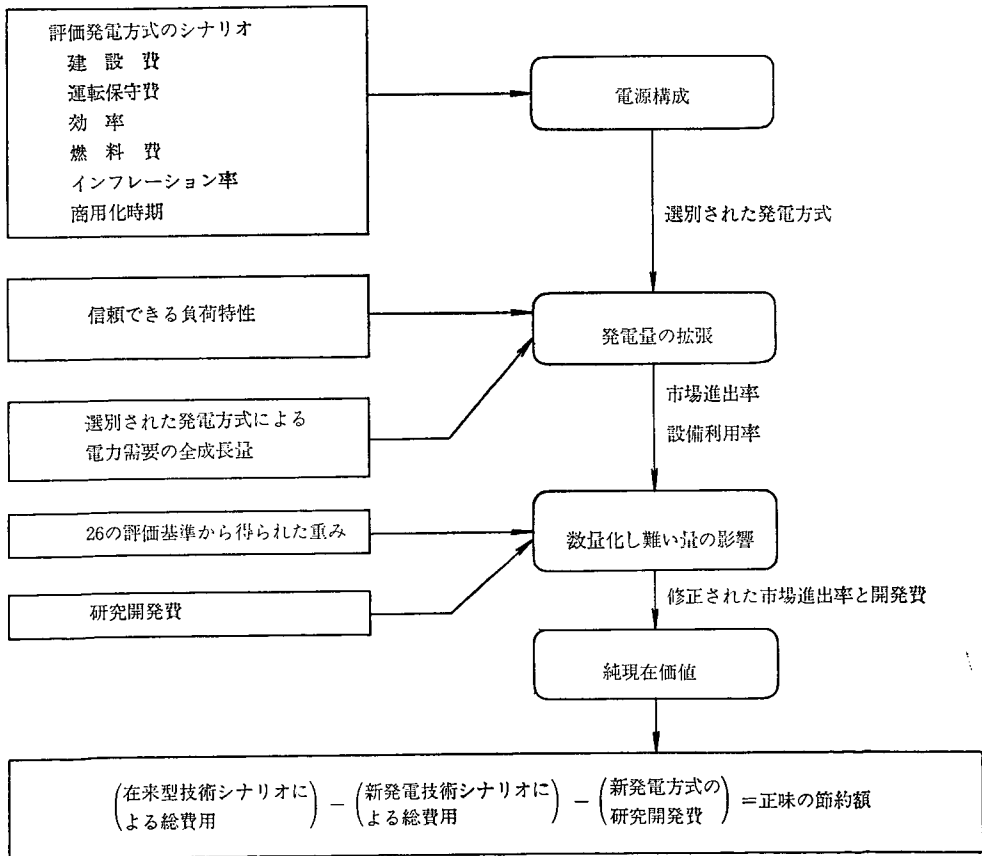


図 2. 純現在価値法

③ 数量化し難い量の影響 (Impact of Intangibles)

「発電量の拡張」で得られた市場占有率と年間設備利用率を電気事業の事業目標に従って確率理論を基に重み因子を決定し修正する方法である。

④ 純現在価値 (Net Present Worth)

これまでの評価法により選別された新発電方式の各種費用, 効率, 修正された市場占有率, 年間設備利用率を用いて, 可能な新方式利用のシナリオを想定して, その利益を算出する。これにより, 在来型技術シナリオに比べどの程度の利益が国全体及び電気事業に生じるかを評価する。

以上, 上で述べた各手法の相互関係を示すと図2のようになる。

4. 研究結果

(1) Phase 1 の結果

Phase 1 の各発電方式に対し, 「均等発電原価」と「直接加重法」の各手法により均等発電原価, 優劣度, 総合効率が求められた。求められた優劣度の結果例を示すと, 表3のようになる。

発電原価と優劣度, 各時期における発電技術の設備利用率について得られた結果が, 図3, 図4にそれぞれ表わされている。

結果の比較から次に述べる4種類の新方式がすぐれていることがわかった。

- 新開放型ガスタービン (空冷, 1,477 K)
再熱, 石油
- 複合方式ガスタービン (空冷, 1,589 K)
低カロリーガス化, 石炭
- 複合方式ガスタービン (水冷, 1,922 K)
低カロリーガス化, 石炭

表 2. 発電原価で評価できない事柄 (Intangibles) の評価基準と評価例 (開放型 MHD の場合)

評価基準	評価		基準の重要度	積点 $\sum p_i$
	優・良・可	点		
1 研究開発費	可	1	1	1
2 開発期間	可	1	17	17
3 開発成功率	可	1	10	10
4 建設費	良	5	8	40
5 運転補修の難易度	良	5	1	5
6 電氣的運転特性の良否	優	10	5	50
7 発電所効率	優	10	2	20
8 負荷追従性	可	1	3	3
9 部分負荷率	良	5	1	5
10 最低負荷率	可	1	1	1
11 強制停止率FOR	可	1	4	4
12 計画停止率POR	良	5	3	15
13 建設資材入手の難易度	優	10	2	20
14 製造の難易度	良	5	2	10
15 安全性	優	10	3	30
16 他のシステムへの依存性	良	5	8	40
17 各種燃料への適応性	良	5	6	30
18 寿命	優	10	1	10
19 建設場所の柔軟性	良	5	4	20
20 排出物の取扱・廃棄	優	10	3	30
21 建設期間	可	1	2	2
22 ユニットの大きさ	可	1	3	3
23 副産物	良	5	1	5
24 環境保全	優	10	3	30
25 燃料・添加物の入手難易度	優	10	5	50
26 起動電力	優	10	1	10
優劣度 (Figure of Merit) $\sum p_i$			(合計)	561

◦ 複合方式ガスタービン (水冷, 1,811 K)

石炭から得られる半クリーン液体燃料

(2) Phase 3 の結果

Phase 3 の発電方式に対しては次の5つのシナリオにより評価された。

- (1) 3種類の新発電方式がすべて開発され
在来方式と共に利用される場合
- (2) 新発電方式として流動層燃焼汽力方式
だけが開発され, 在来方式と共に利用される場合
- (3) (2)と同様低カロリーガス化複合ガスタービン
だけが開発される場合
- (4) (2)と同様開放型 MHD だけが開発

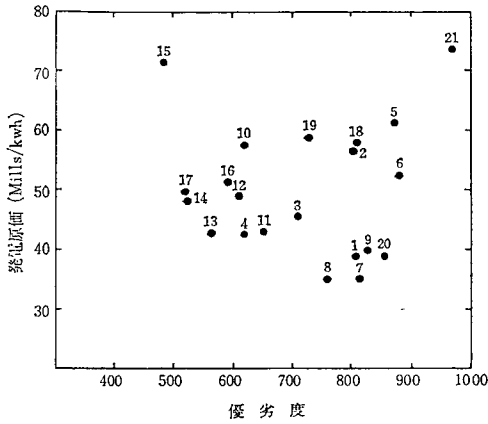


図 3. 発電原価と優劣度 (ベース負荷)

1. 新型蒸気, 流動層
2. 新型蒸気, 在来炉 (石油)
3. 新型蒸気, HTGR
4. 新型蒸気, LMFBR
5. 開放型再熱ガスタービン (高カロリーガス)
6. " " (石油)
7. 複合型ガスタービン (空冷)
8. " " (水冷, 低カロリー)
9. " " (水冷, 石炭液化油)
10. 超臨界圧炭酸ガスタービン
11. ヘリウムガスタービン, 流動層

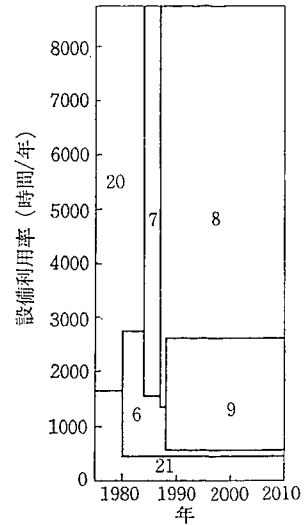


図 4. 電源構成

12. ヘリウムガスタービン, HTGR
13. 開放型MHD
14. 密閉型プラズマMHD
15. 液体金属MHD
16. 金属蒸気タービン
17. 熱電子発電
18. 低温燃料電池 (水素)
19. " " (石油)
20. 在来型蒸気発電
21. 在来型ガスタービン

表 4. Phase 3 サイクルの諸量

発電方式	第1号商用プラント導入時期	燃料費 S/MBtu	プラント建設費 S/kW	全負荷での熱量比 Btu/kWh	運転保守費		プラント規模 MWe	最小負荷率		強制停止率 %	計画停止率 %	研究開発費 MS
					固定	変動		$\frac{P_{min}}{P_{Full}}$	$\frac{\eta_{min}}{\eta_{F1}}$			
					S/kW-y	mills/kWh		%	%			
流動層新汽力 STAFB	1988	0.94	4.47	9,536	2.68	1.75	814	20	75	9	9	228
新複合ガスタービン GTWCCE	1996	0.94	4.74	7,759	1.25	1.83	640	20	87	12	9	417
開放型 MHD OCMHD	2003	0.97	4.77	7,068	1.37	1.50	1,932	60	85	20	15	1,444
在来石炭汽力 STSCR	—	0.94	5.91	10,736	2.44	2.18	747	20	75	18	9	—
在来複合ガスタービン GTCC	—	1.85Oil 3.50SCL	2.82	8,014	1.44	1.29	417	20	87	10	9	—
在来型 ガスタービン GT	—	1.85Oil 3.50SCL	1.16	11,013	0.53	1.37	76	30	70	12	4	—
軽水炉 STLWR	—	0.52	7.76	16,400	2.67	0.68	1,000	50	95	15	15	—

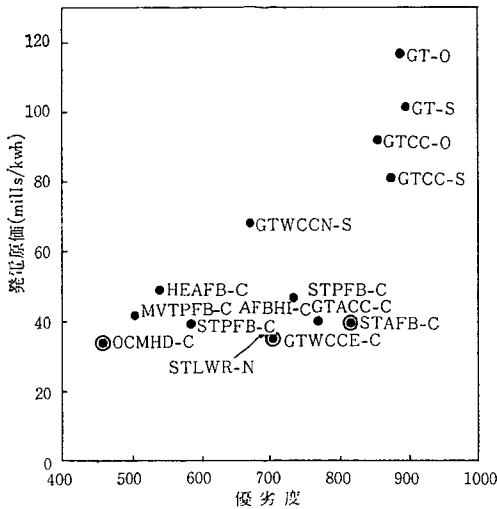


図 5. 発電原価と優劣度 (ベース負荷)

STLWR : 在来型軽水炉
 STSCRB : 在来型汽力
 GTCC : 在来型複合ガスタービン
 GT : 在来型ガスタービン
 STAFB : 常圧流動層新汽力
 GTWCC : 複合ガスタービン(水冷, 低カロリーガス)
 OCMHD : 開放型 MHD
 STPFB : 加圧流動層
 HEAFB : ヘリウムガスタービン, 流動層

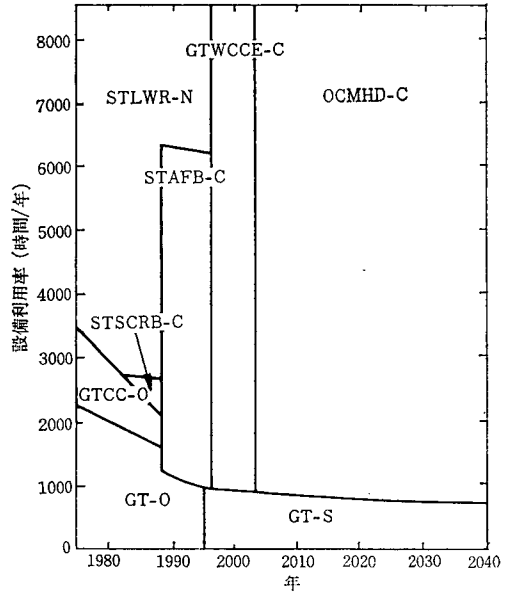


図 6. 電源構成

MVTRFB : 金属蒸気タービン
 GTWCCN : 複合ガスタービン (水冷, 石炭液化油)
 GTACC : 複合ガスタービン (空冷)
 AFBHI : 再熱ガスタービン (高カロリーガス)
 燃料
 N : 核燃料
 C : 石炭
 O : 石油
 S : 石炭液化油

される場合

(5) いずれの新発電方式も開発されず、在来方式だけが利用される場合 (基準例)

発電原価と優劣度、各時期における発電技術の設備利用率について得られた結果を示すと、図 5、図 6 で表わされる。また各シナリオに対する評価結果を表わすと表 4 のようになる。

各評価結果をまとめると次のような結論が導びかれる。

(1) 研究開発費は、新方式導入により得られる節約経費に比べほとんど重要ではない。

(2) 複合方式ガスタービンが“Big Winner”という結果が得られたが複数の発電方式を組み合わせると利益はさらに増大する。

(3) 商用化が遅れると新発電方式の利益が小さくなるため、研究開発期間が数量化し難い量の中で最も重要な事柄である。

(4) 国家的見地から最適な発電方式を普及させるためには、合衆国政府が新発電導入時期における経済的環境を変える必要がある。

(今後の課題)

本研究の主な役割は、評価手法を開発することであるから、ここではこの手法の特徴を述べることにする。

(1) 均等発電原価/直接加重法 (優劣度)

これは、互いに相反する要因を表わしている。すなわち数量化できる「均等発電原価」と数量化し難い量を評価する「優劣度」が表わさ

れている。「均等発電原価」は、プラント寿命期間に得られる費用で、「優劣度」は負荷追従能力、開発成功の確率等からプラントを評価して得られたものである。この両方の評価を考慮せずに発電方式を評価することは誤りであろう。

この2つの指標からは、どの方式がより良いかという明確な答えは出せないが、大きな勝利者と大きな敗者を選別する上で役に立つ。この方法の最も重要な点は、どの方式が好ましく、また好ましくないかを分類する明らかな枠組みを作ることにある。

(2) 純現在価値

この方法は、「新方式への投入費用が、長期的に見て有効になるだろうか」という質問への答えを出すことができる。例えば、短期の研究開発プログラムだが効率があまり高くない常圧流動層汽力と高効率だが長期の研究開発期間をもつ MHD のようなものを明確に区別することができる。この方法は、また数量化し難い事柄が市場占有率にどのような影響を与えるかを理解するのに役立つ。

(うちやま ようじ
電力経済部
エネルギーシステム研究室)