

第4世代原子炉システムのコスト計算

概要 / 目的:

GIF経済性ワーキンググループが開発した第4世代原子炉システムの原子力エネルギーシステム用コスト計算ガイドラインについて説明します。他の原子力発電プラントのコスト計算モデルとの比較、GIF EMWGとIAEA INPROのベンチマーク活動についても紹介します。

講演者紹介:

Geoffrey Rothwell博士 は2013年から経済協力開発機構（OECD、仏国パリ）原子力機関（NEA）の主席エコノミストであり、経済性モデルワーキンググループ（EMWG）の事務局を務めている。2003年には、第四世代ロードマップ委員会の経済性横断的グループの議長として、EMWGの委託事項（TOR）を作成した。また、第四世代原子力システムのコスト評価ガイドライン（GIF、2017）の執筆に積極的に関与した。



1986-2013年にスタンフォード大学で教鞭を執る傍ら、「原子力の経済性」として発行された2004年のシカゴ大学報告「原子力の経済的将来」の改訂（英ラウトレッジ社、2016）のため、アイダホ、オークリッジ、パシフィック・ノースウェスト、及びアルゴンヌ国立研究所と協議した。

ワシントン州リッチモント出身。バークレー・カリフォルニア大学にて博士号取得。

GIF-EMWGの始動時期の振返り:

経済性モデルワーキンググループ (EMWG) は、GIFが支援する技術 (GIFシステム) を選択する第四世代炉ロードマップ委員会を構成する横断的評価手法グループ (EMG) により、GIFシステム選択のための経済的クライテリアを明確にするため設立された。2つのクライテリア:
EC-1 低総資本投資コスト、及び EC-2 低平均コスト (平準化単位エネルギーコスト: LUEC) が選択され、2017年、EMWGにより「コスト評価ガイドライン」及びわかりやすい評価ツール (G4-ECONS) が開発された。

EVALUATION METHODOLOGY GROUP, EMG (2001-2003)

The EMG was tasked with developing a multi-criteria evaluation to be applied by the technical working groups to some 80 variants of nuclear energy systems for the selection of the most promising technologies.

The EMG developed four sets of criteria:

- (1) safety
- (2) economic
- (3) sustainability
- (4) non-proliferation and physical protection

The economic goals were

- (1) To have a clear life-cycle cost advantage over other energy sources, and
- (2) To have a level of financial risk comparable with other energy projects

5

GEN IV International Forum

COST ESTIMATING GUIDELINES FOR GENERATION IV NUCLEAR ENERGY SYSTEMS
Revision 4.2
September 26, 2007

Prepared by
The Economic Modeling Working Group
Of the Generation IV International Forum

The EMG defined the Terms of Reference for the GIF Methodology Working Groups, one of which was the Economic Modeling Working Group (EMWG), which prepared the *Cost Estimating Guidelines for Generation IV Nuclear Energy Systems* (2007).

The "Cost Estimating Guidelines" defined a *Code of Accounts (COA)* with which the TCIC and LUEC are defined.

7

勘定科目コード及びLUEC:

GIF勘定科目コード (COA) がLUEC評価のために開発された。COAは総資本投資コスト (TCIC) を積み上げるためのボトムアップ手法である。LUECは平均化TCIC、運転・修繕 (O&M)、及び燃料コストにて構成される。

LEVELISED UNIT ENERGY COST (LUEC) in dollars, euros, etc. per megawatt-hour

KC Capital Cost is equal to the payments each year to the banks and investors, like a annual mortgage payment, to pay down the **Total Capital Investment Cost**

O&M is the annual Operations and Maintenance (O&M) expense and Capital Additions, CAPEX

FUEL is the annual fuel payment, a function of the amount and price of fuel

E the sum of which is divided by the **annual energy output** in megawatt-hours (MWh) equal to the product of MW, the size of the generator in megawatts, TT, the total number of hours in a year, and CF, the Capacity Factor

Source: Rothwell, Economics of Nuclear Power (2016, p. 154). London: Routledge.
<https://www.routledge.com/Economics-of-Nuclear-Power/Rothwell/p/book/9781138858411>

9

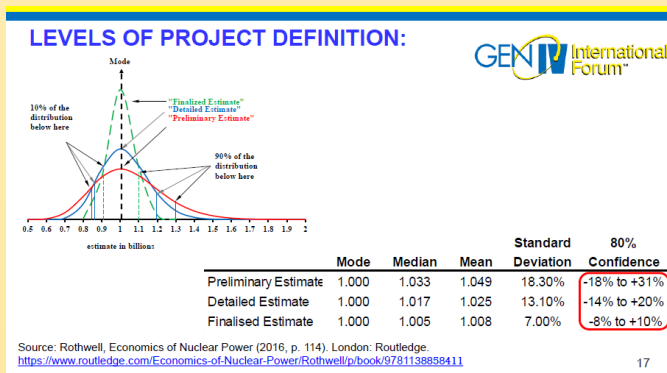
The GIF Code of Accounts (COA):

Account Number	Account Title
10	Capitalized Pre-Construction Costs
20	Capitalized Direct Costs
21	Structures and Improvements
22	Reactor Equipment
23	Turbine Generator Equipment
24	Electrical Equipment
25	Heat Rejection System
26	Miscellaneous Equipment
27	Special Materials
30	Capitalized Indirect Services Costs
35	Design Services Offsite
36	PM/CM Services Offsite
37	Design Services Onsite
38	PM/CM Services Onsite
40	Capitalized Owner's Costs
50	Capitalized Supplementary Costs
55	Initial Fuel Core Load
60	Capitalized Financial Costs
63	Interest During Construction
69	Contingencies
70	Annualized O&M Costs
71	O&M Staff
72	Management Staff
73	Salary-Related Costs
74	Operations Chemicals and Lubricants
75	Spare Parts
76	Utilities, Supplies, and Consumables
77	Capital Plant Upgrades
78	Taxes and Insurance
79	Contingency on Annualized O&M Costs
80	Annualized Fuel Cost
81	Refueling Operations
84	Nuclear Fuel
86	Fuel reprocessing Charges
87	Special Nuclear Materials
88	Contingency on Annualized Fuel Costs
90	Annualized Financial Costs
92	Fees
93	Cost of Capital
99	Contingency on Annualized Financial Costs

11

TCIC:

TCICは直接費、基準建設費、間接費、所有者コスト、財務コスト、及び建設中利子(IDC)、不確実性コスト(Contingency)にて構成される。財務コスト、利子及びContingencyを除くTCICはオーバーナイトコストと称される。いくつかの場合、初装荷燃料は燃料コストとして扱われるが、このコストは初期コストとして大きいいため、このケースでは資本コストとして考えらる。例えば、オークリッジ国立研究所(ORNL)によって推定された溶融塩炉(MSR)のオーバーナイトコストは3350ドル/kWe(2011年米ドル)であった。IDCは建設期間に依存する。適切なContingencyの推定が必要となる。Contingency率はプロジェクトの段階によって減少し得る。例えば、2011年ORNLにより推定された9%濃縮ウランを用いた革新的高温炉(AHTR)システムのTCICは、PWR12の4012ドル/kWeと比して3149ドル/kWeであった。



TOTAL CAPITAL INVESTMENT COST

Advanced High Temperature Reactor Systems and Economic Analysis calculates the TCIC for a "Better Experience" BE ("Nth-of-a-Kind") version of the PWR-12 and compares it with 19.75% and 9% enriched uranium for the AHTR. However, these estimates do not include contingency, which would "increase the cost estimate by at least 25%" (p. 88)

Capital cost, in millions of 2011 dollars (enrichment)	PWR12 3%	AHTR 19.75%	AHTR 9.00%
Capitalized preconstruction costs (accounts 11-19)	\$6	\$6	\$6
Capitalized direct costs (accounts 21-29)	\$2,171	\$2,391	\$2,391
Capitalized support services (accounts 31-39)	\$1,323	\$1,323	\$1,323
Capitalized operations costs (accounts 41-49)	\$300	\$300	\$300
Overnight cost without initial fuel load	\$3,800	\$4,019	\$4,019
Initial fuel load	\$135	\$419	\$111
Total overnight cost with initial fuel load	\$3,935	\$4,438	\$4,130
Interest during construction (calculated)	\$655	\$739	\$688
Total Capitalized Investment Cost (TCIC)	\$4,590	\$5,177	\$4,818
Reactor net electrical capacity (MW)	1,144	1,530	1,530
Specific TCIC (\$/kWe)	\$4,012	\$3,384	\$3,149

O&M and 燃料コスト:

人件費及び修繕費のようなコストはO&Mコストとして推定される。

除染&廃炉(D&D)コストは減債基金への寄与として推定される。

燃料コストはフロントエンド及びバックエンドコストを含んでいる。9%濃縮ウランを用いたAHTRシステムの燃料コストは、PWR12の5.60ドル/MWhと比して、10.74ドル/MWhと推定された。

ANNUAL O&M COSTS IN G4ECONS

System 80+ (PWR that became the AP1400)	
70 OPERATIONS COST CATEGORY	
71+72 On-site Staffing Cost (71: non-mgt 72: mgt)	31.50 \$M/yr
73 Pensions and Benefits	6.29 \$M/yr
74+76 Consumables	18.64 \$M/yr
75 Repair costs including spare parts and services	10.93 \$M/yr
77 Capital replacements/upgrades (levelized)	0.00 \$M/yr
78 Insurance premiums & taxes & fees	11.12 \$M/yr
79 Contingency on O&M	0.00 \$M/yr
70 Total O&M	78.47 \$M/yr
Annualized D&D cost per MWh	0.27 \$/MWh
Total O&M + D&D	8.61 \$/MWh
58 Decontamination & Dismantling (D&D)	
Sinking fund interest	5% /yr
Sinking fund factor	0.83% /yr
40 yrs	
Annualized D&D	2.48 \$M/yr

Annual D&D costs are calculated as contributions to a sinking fund, earning the same rate of return as the weighted average cost of capital, r :

$$A = D \cdot D \cdot \{ r / [(1 + r)^N - 1] \}$$

where D&D is a fraction of Direct Cost (Account 20), e.g., 33%

ANNUAL FUEL COSTS

$$FC = NU \cdot P_{UF6} + SWU \cdot P_{SWU} + P_{FAB}$$

NU is the ratio of natural uranium input to enriched uranium output,
 P_{UF6} is the price of natural uranium input plus its conversion to UF_6 ,
 SWU is the number of Separative Work Units (SWU) required in enrichment,
 P_{SWU} is the price of enriching uranium hexafluoride, UF_6 ,
 P_{FAB} is the price of fabricating UO_2 fuel from enriched UF_6 , and

$$F = \{ [FC / (24 \cdot B \cdot \text{eff}) + \text{WASTE}] \cdot E$$

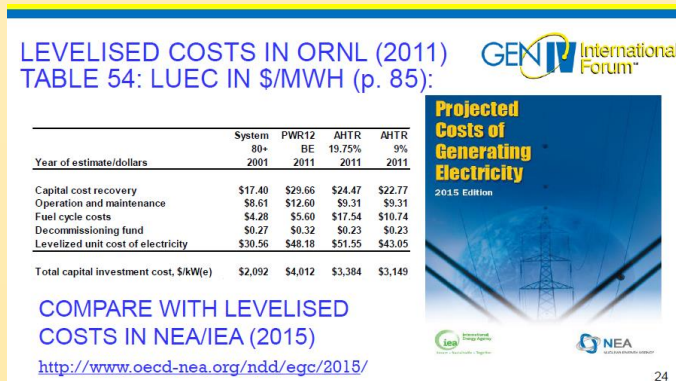
FC is the cost of nuclear fuel in US dollars per kilogram of uranium (US\$/kgU),
 24 is the number of thermal MWh in a thermal megawatt-day,
 B is the burnup rate measured in thermal megawatt-days per kgU,
 eff is the thermal efficiency of converting MW-thermal into MW-electric,
 WASTE is the interim storage cost per MWh

Source: Rothwell, Economics of Nuclear Power (2016, p. 156). London: Routledge.
<https://www.routledge.com/Economics-of-Nuclear-Power/Rothwell/p/book/9781138858411>

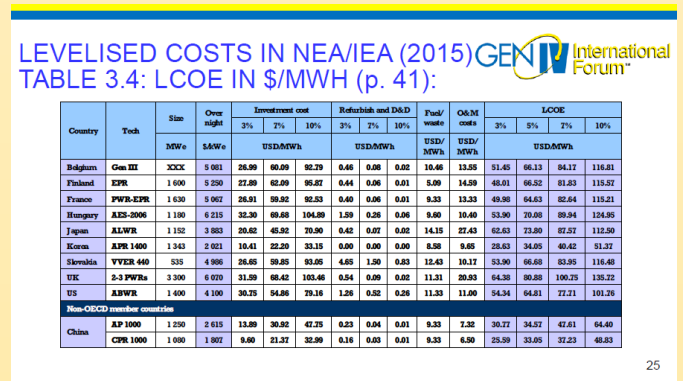
ORNL及びNEAのコスト評価:

ORNLは System80+のLUECを30.56ドル/MWh、9%濃縮ウランを用いたAHTRシステムを 48.18ドル/MWhと評価している。

NEA は定期的に各国の平準化コストの推定を報告しており、韓国のAR1400、及び中国のAP1000/CRP1000については、比較的安いオーバーナイトコストが見積もられている。



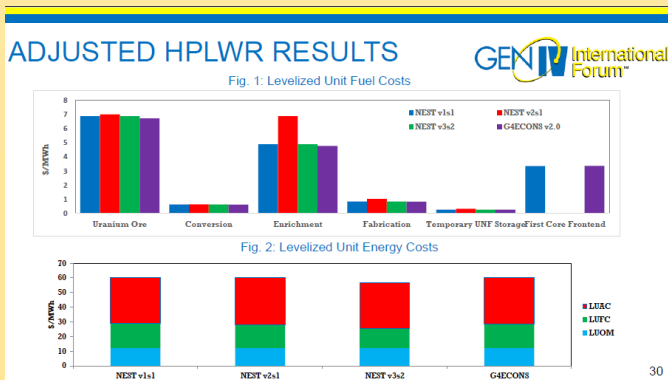
24



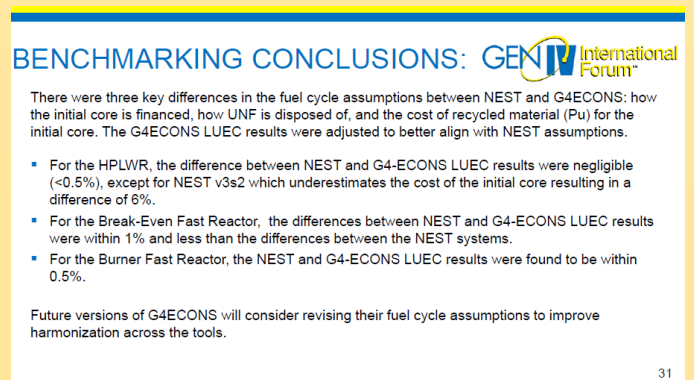
25

G4-ECONS とIAEA開発のNESTのベンチマーク:

NESTはIAEAにより4つの段階で開発され、第4版において増減なし(break-even)クローズド燃料サイクルと複数の転換比を扱えるように拡張された。熱炉(KITによる高性能LWR)と高速炉(ロスアトム(BN-800))を用いたG4-ECONSとNESTのベンチマーク評価が実施され、少しの違いはあるが大きくはないことが確認された。



30



31