

■ 論 説 ■

# エネルギー資源長期備蓄の最適型

Optimum form of Energy Resources for Long-term Storage.

佐野 寛\*  
Hiroshi Sano



## 1. はじめに

エネルギーの大量・長期備蓄に現在もっぱら原油が当てられているがその備蓄コスト・立地・公害保安・供給性など問題山積である。各種燃料の備蓄適性を洗い直すため、貯蔵容積・保安・長期維持経済性などを比較し、さらに備蓄物の現在供給力と回収時需要（エネルギーライフサイクルの整合性）をも検討した。その結果、アスファルト沈水備蓄が最も有望と推定されるのでその得失・開発課題などを明らかにする。

## 2. エネルギー備蓄の第1条件＝エネルギー密度

備蓄燃料には、輸送費（荷役・配送）と貯蔵費（占有面積・施設・保安）が安価なことが望ましいが、ランニングストック（約45日分）と異なる長期備蓄では特に貯蔵性が最優先課題で、それは主にエネルギー密度に支配される。気体貯蔵は、天然ガス（10 Kcal/ℓ）など石油の約1/1,000のケタでお話にならない。また、熱貯蔵も熱水（80°/30°）＝50 Kcal/ℓ、ナフタリン融解熱40 Kcal/ℓ、石灰水と熱（CaO + H<sub>2</sub>O）＝350 Kcal/ℓと石油の1/100付近で対象外になる。

今、日本において入手可能性のある液体、固体燃料の代表を選び、その体積発熱量（cal/ℓ）を求めて図-1に比較列挙した。液体燃料、特に重質系の油の優越性は一見して明瞭である。

固体燃料の低カロリー性の主たる理由は空隙率にある。石炭は重量発熱量で平均 7,000 Kcal/kg と低いが発熱量が真比重が重い(1.45±0.15)ため空隙さえなければ原油とほぼ同じレベルになり得る（これは後述のSRCコムで再考される）。乾性バイオマスで木材に次ぐ資源、ワラ・モミは重量発熱量では 4,500 Kcal/kg あるが9割が

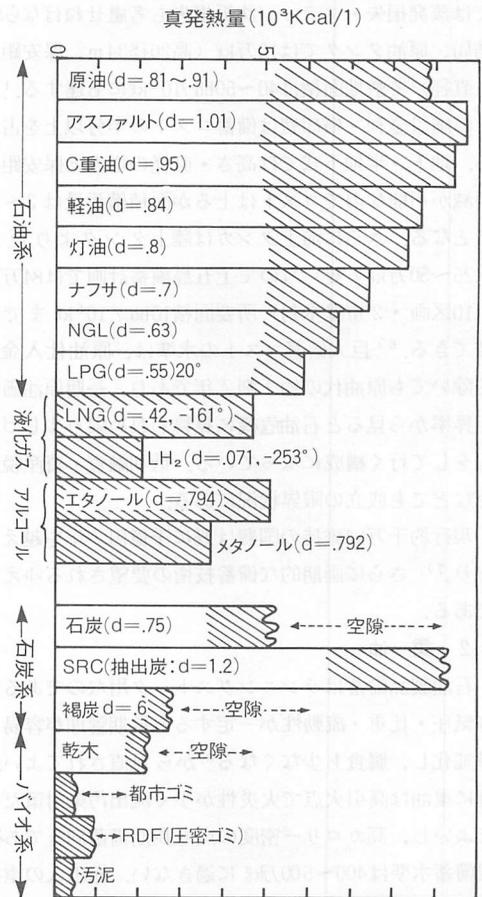


図-1 各種燃料のエネルギー密度 (カロリー/容積)

空隙で全く貯蔵不適である。また高水分で低カロリー化する代表例は都市ゴミ（水分 50%）、圧搾汚泥（水分 70%）であり貯蔵は不利である。

エネルギー密度以外の貯蔵性阻害要因を列挙する。  
 低沸点：断熱保冷（LNG, LH<sub>2</sub>）、加圧（LPG）、漏洩引火性（ナフサ, NGL）  
 発火性：（石炭, 褐炭, ゴミ）  
 風化・発熱量損失：（同上）

\* 通産省工業技術院大阪工業技術試験所燃焼化学研究室長  
〒561 池田市緑丘1

変敗・悪臭：（ゴミ，湿性バイオマス一般）

毒性・水溶性・流出性：（油類）

崩落性：（固体燃料一般）

### 3. 現状の燃料備蓄各論

#### 3.1 原油

日本の主なエネルギー輸入形であるため原油備蓄は本命視されてきた。しかし原油は低沸点分を含むため常温で引火性が強く、漏洩防止・防災設備が必要で、流出汚染に対し防油堤やタンク間距離確保さらに長期では蒸発損失・スラッジ沈析損失も考慮せねばならぬ。結局、原油タンクでは10万kl（高20径34m，保安距離>直径）で敷地面積は40~50ha/10<sup>6</sup>klにも達する。<sup>1)</sup>この施設金利・償却費は備蓄コストの半分以上を占める。地下・半地下式では高さ・直径の増大と保安距離半減が可能なのでコストは上るが面積備蓄量は2~4倍となる。さらに海上タンカは陸上タンクより巨大（25~50万kl/隻）なので上五島備蓄計画では84万kl（10区画・2重壁水封）所要面積10ha/10<sup>6</sup>klまで縮減できる。<sup>6)</sup>巨大備蓄コストの水準は、原油仕入金利を除いても原油代の約1割/年であり、長期原油価格上昇率から見ると石油危機に見舞われぬ限り少しづつ損をして行く構成になっている。低利融資・資産税減免などでも成立の限界状況にある。

現行約千万kl維持の国費は既に千億円/年を越えており、<sup>7)</sup>さらに画期的な備蓄技術の要望されるゆえんである。

#### 3.2 重油

石油製品備蓄はランニングストック用なのであるが蒸気圧・比重・流動性が一定すると長期管理が容易・単純化し、腐食も少なくなる<sup>8)</sup>から見直されてよい。特に重油は高引火点で火災性が少く流出汚染対策だけでよいし、高カロリー密度の点も長期備蓄向きである。現備蓄水準は400~500万klに過ぎない。搬出入の重複コストを避けるためには輸入重油が長期備蓄対象として好ましい。

#### 3.3 固形原油

ミナス・大慶原油（融点約30°）は保温タンクを要し備蓄不適とされてきたが、固化状態の方が流出性・スラッジ析出・蒸発損・接触水汚染僅少（溶出COD<1ppm）で管理が安価になる。<sup>9)</sup>取出しにトップヒータが必要になる。

#### 3.4 LPG

LPGは石油の最低沸点分得率は約3%，沸点-

42°/プロパン，-0.5°/ブタンと常温で気体であり，小型球状圧力タンク（<5,000t，40°でC<sub>3</sub>:14気圧，C<sub>4</sub>:4気圧）か大型低温タンク（4万t級）で液化貯蔵される。二重冷凍断熱壁や広い保安距離のため，石油比較で建設費約3倍・敷地1.5倍，年間備蓄コスト4~6倍となる。地下冷凍タンクで2割安ていどが見込める。基本的にランニング向き燃料だが1981年20日分からは始めて1998年50日分備蓄を目指している。NGL（C<sub>5</sub>成分，沸点36°，40°で1.2気圧）は常温貯蔵が楽になるが，原油とLPGの間である。

#### 3.5 LNG

1982年にLNG輸入量は石油の1割を越し，ランニングストックのみでも巨大な負担となりつつある。超低温（-162°）を要し2重殻・保冷断熱層を施した巨大タンカでも0.2~0.3%・日のボイルオフは避け難く，またLPGなみの再液化はコスト高（燃料費の1/3）で困難である。巨大地下備蓄でも地盤の凍上・凍結圧など問題が多い。石油比較で受入施設・輸送費3~4倍年間備蓄費10倍と見込まれよう。

#### 3.6 メタノール

組成一定しており管理し易いがカロリー密度が原油の半分（図-1）なので備蓄費は2倍弱となろう。巨大備蓄例はない。

以上の液体燃料の総合備蓄適性は，次の順位となる。

重油>灯油>原油>メタノール  
>NGL>>LPG>LNG

#### 3.7 石炭

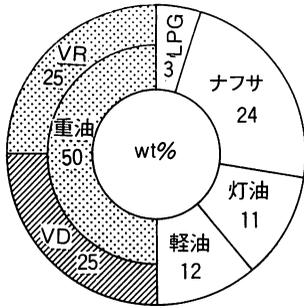
ポスト石油の巨大資源候補であり，現在も石油の約1/4量の輸入があり拡大計画もある。45日のランニング備蓄が必要であり，750万t（500万kl油相当）を集中するコールセンター構想では用地に敷詰めると石油基地の10倍の面積エネルギー密度が可能である。しかし自己酸化・発火・発塵防止に散水を続けてもおカローリ損失は1~5%・年（褐炭では20%・年<sup>10)</sup>）に達し長期備蓄向きでない。長期貯炭は水中方式が望ましい。

#### 3.8 コム

重油：石炭をカロリー比で6：4に混合した流体で空隙率ゼロ，発火性もない。沈降防止攪拌で維持費がかさみ長期向きでない。固化備蓄ならば再考できる。

### 4. 石油の重質化と備蓄物の入手性

石油の留分分布はほぼきまっています図-2のように半



VR: 真空残油 (アスファルト)  
VD: 真空軽油

図-2 石油成分の分別  
(常圧蒸留後, 真空蒸留)

分が重油 (常圧蒸留残渣油) である。石油供給は資源が重質化をたどっているのに需要は軽質化が進み<sup>11)</sup>, 1990年には重油需要は30%を割ると予想されている。この需給ギャップへの主な対策は重質油水素化分解で1985年頃から立上ると期待されている。しかし重質油分解は建設費が高価なだけでなく、水素消費 (4~5 cal%) やプロセスエネルギー消費 (7~10 cal%) が大きい<sup>12)</sup> ので省エネの立場からは飛躍的改善が望まれる。

石油の蒸留分別を限界まで進めると (図-2) 重油の半量が脱硫精製容易な真空軽油 (VD), 残りが釜残の超重質油 (VR, アスファルト) となる。このVRは石油中のS分・N分の大部および重金属灰分・残炭分の全部を濃縮含有するので極度に精製困難な公害油である。VRの用途には①排脱付燃焼, ②船用, ③重質油分解待ちの3選択枝がある。大規模排脱が可能なのは火力発電であるが現行火力の石油消費は23%なのでVR全量を消化する容量はない。船用重油はさらに少く4%である。重質残分を減らすには図-3のようにVRを更に強いビスプレ (>450°) につけ分解できるだけの油を回収し<sup>13)</sup> 厄介者の高粘度・高残炭油をホットなまま on site 噴霧燃焼するカスケード型一貫製油所

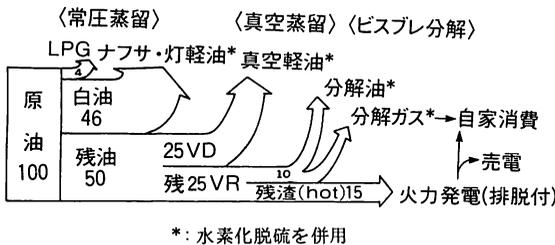
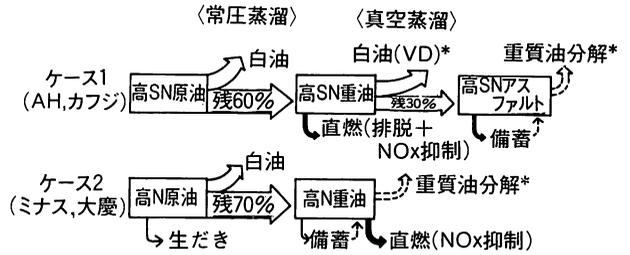


図-3 望ましい一貫製油プラントモデル  
(%: E得率)



\*は水素化脱硫または水添分解を併用

図-4 高硫・高窒素原油の用途選択枝

が最高のシステムである。ここで排煙脱硫には高硫ガスを積極的に資源化利用できるWL法が、現行の石灰排脱法よりも原理的に優位に立つことになる。これらの解決策が実現する前は、VRを重質油利用開発待ちの備蓄へ廻す選択枝が現れる。高SN原油 (中東系) と高N原油 (東ア系) の分別用途は図-4のように少し異ってくる。<sup>2)</sup> なお高N原油には 前述の固化長期備蓄パスも同時に採用できる。

5. アスファルト備蓄の提言

ランニング用のアスファルトは170°保温液体貯蔵されるので長期備蓄不適と見られがちであるが、固化を認めれば一転してその安定性・高密度性により抜群の備蓄メリット (表1) が現われてくる。

5.1 石油各成分の危険性・公害性

これまで石油備蓄はランニングストックの延長の視点で2~5年で払出し更新を原則としてきた。そのため長期となると油蒸気ロス・大気汚染・火災危険・スラッジロス・タンク洗浄保守などの負担が重い。特に原油は保安面・公害面で各成分の欠点のすべてを兼備しており (表1) 最悪といえる。<sup>1)</sup>

最重質油アスファルトはその点、真空蒸留残渣 (VR) なので蒸気圧ゼロ、大気汚染・引火性もなく、常温固体 (軟化点>55°, 融点>120°) なので流出性は

表1 石油各種成分の危険・公害性

留分	常温蒸気圧 (atm)	常温引火性	流出性	付着性	水溶性 (ppm)	折る折出性	備蓄維持コスト
原油	0.1~2	大	大	大	50~200	有	大
LPG	2~15	大	大	—	—	—	巨大
ナフサ	0.1~0.3	大	大	—	—	—	大
灯軽油	10 <sup>-3</sup> (>40°)	大	—	—	10~50	—	中
重油	(10 <sup>-4</sup> ) (>70°)	大	大	大	(1~5)	有	中
アスファルト	— (>200°)	—	—	小 (<1)	—	—	小

( ) 推定値

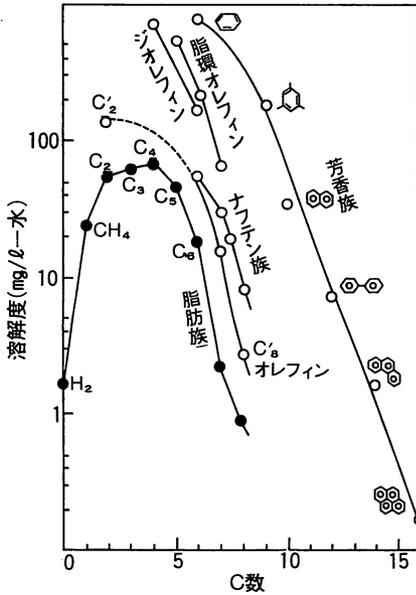


図-5 炭化水素の水溶性

なく加熱せぬ限り付着性もない。油の水溶性は水封備蓄の際の水汚染に関連して重要だが図-5のようにC<sub>2</sub>~C<sub>4</sub>付近で最大でありC数倍増ごとに約2ケタずつ溶解度が下がるから巨大分子VRの溶解度は無視できる。ただしナフテン系は5倍、芳香族は約100倍も可溶性なので油種の差はあろう。溶解度の大きい場合でも固体内拡散が律速になるから溶出はすぐ減衰し、半地下式水封備蓄や着底式海洋備蓄での漏油や水汚染の恐れはさらに少なくなる。

5.2 アスファルト沈水備蓄

油が水に浮くのは常識であるがアスファルトは水より僅かに重く(図-6)水に沈めることができ、火災性や酸化劣化損失を根絶できる。石油は煮詰めて行くにつれて比重を増し重油→アスファルト(真空残油)の段階で水を追越す。<sup>3)</sup>パラフィン系原油のミナス・大慶は例外で真空残油でもなお水より軽く沈水備蓄の対象にできない。溶剤脱歴は深絞り蒸留と同様、さらに重質化が可能である。絞りは軟化点や硬さを支配するので、再回収時のヒートカッターの使い易さを考慮して設定すべきである。<sup>1),5)</sup>アスファルトはナフテン多環(5~10環)が主成分であり、熱処理すると脱水素芳香化が進みC/H比の上昇と共に比重も増大して行く(図-6右上)。

面白いことにこれはまた石炭の可溶化抽出物(SRC-O)類似物でもある(ソルボリシス液化の原理)。抽出炭を少し水素化すると環の継ぎ目が切れ芳香5環で

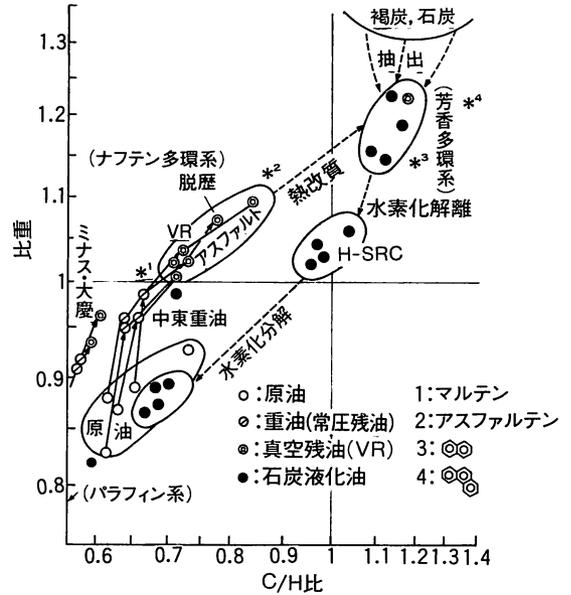


図-6 重質油の比重とC/H比の相関

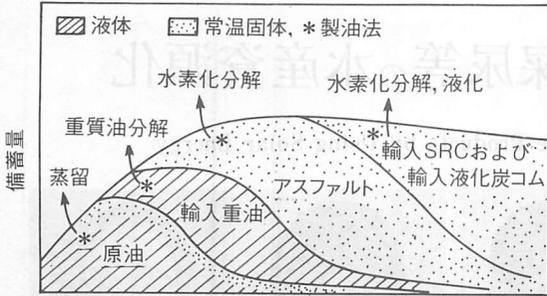
いどの低融点液化炭(H-SRC)ができ、C/H比は大きい石油系アスファルトとほぼ同比重となる。したがってアスファルト沈水備蓄の普及は、将来の重質液化炭の受け皿を用意することにもなる。

沈水備蓄は油タンク不要で保安距離の問題もないから、例えば開水域に30m厚×1km<sup>2</sup>で3千万klの超巨大備蓄が容易となり、屋根・側壁巻立ても原則的に不要なので用地・建設費問題の大巾緩和が期待できる。

6. エネルギー備蓄のライフサイクル

備蓄燃料の選定にはその資源の供給時期だけでなく取出す需要時期も想定できなければいけない。<sup>14)</sup>最も望ましくは、その資源が現在過剰気味であり、ある一定の将来は大需要が見込めることである。この見地から短期備蓄には原油が適し、長期備蓄には今引取手の少い輸入重油(現地製油の拡大により漸増傾向)が、さらにより長期備蓄には国内製油所の末端産品としての余剰アスファルトが適する(図-7)。1990年以降では重質油分解の進歩普及でこれらは重要資源として認知されると期待してよい。

備蓄取崩しは、数回の石油危機を伴う<sup>4)</sup>石油半衰期に到って本格化する。重質油取崩し後に参入すべき代替資源は石炭の重質液化油である。石炭液化軽質油分は産地自己消費が優先し輸入は困難であろう。この重質固体SRCは備蓄物性・重質分解必要性などアスファルトに似ているので移行が容易な点が評価できる。



現在…原油重質化・現地製油拡大…石油半衰期…石炭主流期

図-7 エネルギー備蓄系のライフサイクル (ラニングストックを除く)

また〔石炭+SRC〕で作る産炭地コム(可融固体)も石炭の風化性・発火性が消失するので次世代の長期備蓄対象として取込むことができよう。

石油が圧倒的なシェアを占める現代の燃料フローが重質化進行期→ポスト石油期の順に従っていかに変質移行すべきかの展望は他誌<sup>5)</sup>にゆずるが、石油期から石炭期への移行がスムーズに行くか否かは石炭も石油

も全面的に輸入に依存する日本にとっては死活問題である。日本のエネルギー技術開発はこの転換期乗切りが使命であり、エネルギー長期備蓄もその回転軸としての役割を自覚せねばならない。

参 考 文 献

- 1) 佐野; 燃料及燃焼, 45, 130 (1978); 47, 457 (1980)
- 2) 佐野; ibid., 45, 393 (1978)
- 3) 佐野; ibid., 48, 804 (1981)
- 4) 佐野; ibid., 47, 97 (1980)
- 5) 佐野; ibid., 49, 241 (1982); 49, 321 (1982)
- 6) 小坂; 作業船, 141, 31 (1982)
- 7) 日刊工業新聞 1982-8-23
- 8) 三笠, 燃料及燃焼, 46, 33 (1979)
- 9) 新日鉄, エナジーエンジニアリング, 東電, 化学工業日報 1982-7-24; 石油公団, ibid., 1982-11-10
- 10) P. D. Swann, Fuel, 58, 276 (1979)
- 11) エネルギー, 1981-2, 94; エネルギー-経済, 1981-9, 45
- 12) 志鷹, 燃協誌, 57, 961 (1978)
- 13) 石油誌, 24, 44(I), 54(II), 61(III), 71(IV), (1981)
- 14) 富舘, エネルギー-経済, 1981-12, 10

話の泉

快挙 森康夫教授(東京工業大学)に

ASME 1982年度 Heat Transfer Memorial Award 賞

35年間にわたり伝熱学の研究に従事してこられた、森康夫教授(東京工業大学工学部機械物理学科)は、アリゾナ州フェニックスで開かれた米国機械学会第103期冬期年次大会(WAM)で、去る11月18日、ASME会長のR. B. Gaither氏から伝熱学記念賞を受賞された。

同賞は国籍、年齢、会員、非会員の別なく贈られるが、今回の受賞は、日本人として、またASME会員外としては初めてである。写真の表彰状には「……二次流れを伴う強制対流伝熱、プラズマの伝熱の基礎、ガス炉および高温ガス冷却原子炉への応用を中心とする高温伝熱現象を解明した研究業績、そして永年の伝熱学の教育、さらには国際伝熱共同体、工業および政府への協力などの顕著な伝熱学への功績を永久に記念するため……」とある。



The American Society of Mechanical Engineers

presents the

1982

Heat Transfer Memorial Award

Established in 1959 by the Heat Transfer Division to perpetuate the memory of distinguished colleagues

to

Yasuo Mori

For his contributions to the understanding of the mechanisms of forced convective heat transfer with secondary flow, fundamentals of plasma heat transfer and high temperature heat transfer with applications to gas furnaces and gas-cooled nuclear reactors, his long-term devotion to heat transfer education, and his services to the international heat transfer community, industry and government.

