

(補論 5)

石油化学工業内部での石油製品のエネルギー転換について

1. 石油化学工業における主要生産工程の概要

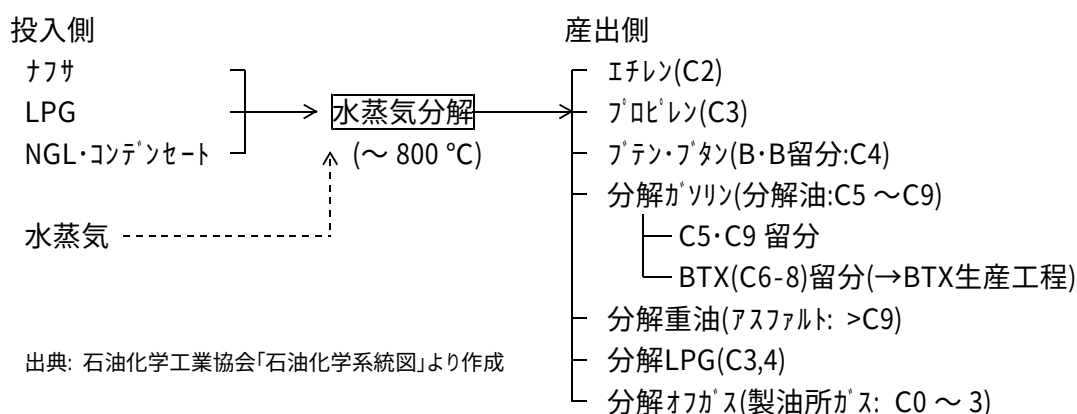
石油化学工業における主要生産工程は、エチレン生産工程とBTX生産工程の2つである。

(1) エチレン生産工程(分解工程) (図: 補 5-1.)

石油化学においては、ナフサ、LPG、NGL・コンデンセートなどの原料を、ナフサ分解炉(Naphta Cracker)において水蒸気とともに 800℃程度に加熱された管状炉に投入し、そこで生じる分解反応によってエチレンなどの基礎化学製品を生産する用途に用いている。

当該分解反応においては、炭化水素への水素添加による分解反応と炭化水素の脱水素反応(不飽和化、環状化)が同時に進行するため、産出側では炭化水素分子が分解されて分子量が小さくなるとともに、脱水素されることにより反応性に富んだ二重結合やベンゼン核などを持つ不飽和炭化水素を多く産出することが特徴である。

[図: 補 5-1. エチレン生産工程(分解工程)の概要]



(2) BTX生産工程(抽出工程)

石油化学においては、また改質生成油などの石油製品を、溶媒抽出・蒸留抽出などの処理によってベンゼン(B)、トルエン(T)、キシレン(X)などの芳香族系基礎化学製品(BTX)を生産する用途に用いている。

BTX生産工程においては、大きく分けて溶媒抽出法、蒸留・溶媒抽出法の2通り^{*1}の生産方法があるが、その原材料と生産方法により中間製品の産出先は下記のように異なっている。

1) 分解ガソリン溶媒抽出法(図: 補 5-2)

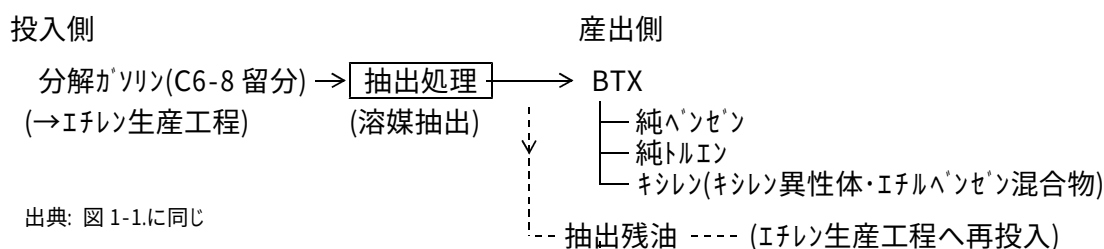
溶媒抽出法のうち分解ガソリンを原料とする方法は、主にエチレン生産工程(分解工程)を持つ石油化学工場で行われており、エチレン生産工程から副生する分解ガソリンの一部(C6-8留分)が原料として用いられている。産出側においては、BTXを抽出した残りの部分^{*2}が抽出残油として産出されるが、抽出残油の性状はナフサに極めて近いこと、本方式の工場はエチレン生産工程(分解工程)に併設されていることから、抽出残油は大部分がナフサとしてエチレン生産工程に再投入されている。抽出残油は石油化学工場内で再循環し、エチレン生産工程のナフ

*1 BTXの製法にはここで説明する石油系の他にコークス炉からの副生油を使った石炭系の製法があるが、量的に非常に小さく、生産企業が特定されるため統計上識別して計上されていない(秘匿)ことから無視して考えている。

*2 石油化学では溶媒抽出工程の残油を一般にラフィネートと呼んでいる。蒸留抽出の場合の残油はラフィネートとは呼ばないので、ここでは「抽出残油」と呼ぶ。

サ投入量の内数となっているため直接の統計は取られていない。

[図: 補 5-2. BTX生産工程(分解ガソリン溶媒抽出法)の概要]

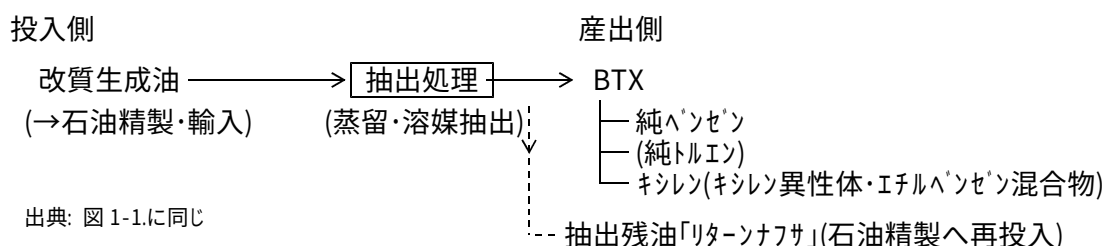


2) 改質生成油蒸留・溶媒抽出法(図補 5-3)

改質生成油蒸留・溶媒抽出法は、改質ガソリンの生産の際に副生する改質生成油から、沸点差を利用して主にキシレン(X)を抽出し、さらに溶媒を用いて主にベンゼン(B)を回収する方法であり、揮発油等品質確保法の規制に対応してガソリン中のベンゼン分を低減させる必要上から石油精製の製油所で行われている生産方法である。

投入側においては改質生成油が原料として用いられている。産出側においては、BTXと抽出残油が産出されるが、改質生成油由来の抽出残油は良質のガソリン基材となるため大部分が「リターンナフサ」として石油精製工程に再投入されている。「リターンナフサ」となる抽出残油の量は、製油所内で再循環したり、製油所と近傍の石油化学工場間で受渡しされる量であるため統計が取られていない。

[図: 補 5-3. BTX生産工程(改質生成油蒸留・溶媒抽出法)の概要]



(3) 石油化学の立地形態・経営形態と石油精製

石油化学については、石油精製により産出するナフサ・改質生成油など取扱いの難しい中間製品を大量に処理する必要上から、通常製油所の敷地内かあるいはこれに隣接する敷地に立地し、さらに二次製品・三次製品を生産する有機化学系の工場を従えたコンビナートを形成している。歴史的経緯や近年の両業界の経営統合による合理化の進展などの関係から、石油化学のうちBTX関連製品の生産が製油所の敷地内で石油精製会社の一事業部門として行われていたり、石油化学会社が石油精製会社と資本関係・提携関係にある場合が多く、石油精製と石油化学は経営面でも密接に結びついている。

このような密接な関係が背景となって、石油精製と石油化学の間での物流を外形的な統計から把握する際には、特段に慎重な取扱いを要する状況となっている(表補 5-1)。

[表: 補 5-1. 国内BTX生産(抽出)設備・生産能力と製油所併設状況(2004 年度)]

	企業数	総生産能力(10 ³ t/年)	能力構成比(%)			
			ベンゼン	トルエン	キシレン	
国内BTX生産設備	27	12840	5411	1613	5816	--
うち製油所併設	13	7241	2250	865	4126	56.4 %
うち非併設	14	5599	3161	748	1690	43.6 %

出典: 石油化学工業協会「石油化学工業の現状」(2003)、各社HP・社史などから筆者作成

2. 石油化学工業のエネルギー転換に関する推計と問題点

(1) 石油化学原料用石油製品の重要性

石油化学で使用されている原料用石油製品は、石油精製により原油から生産されたナフサや改質生成油などであり、プラスチックや塗料・洗剤などの有機材料・薬品を作るための原料として用いられている。

本補論の対象となる石油化学原料用石油製品向のエネルギー消費は、代表的な非エネルギー消費であり、2002 年度実績では非エネルギー消費量の約 70 %を占めている。

2001 年度改訂総合エネルギー統計において、エネルギー起源二酸化炭素排出量は下式で推計されていることから、石油化学原料用石油製品のエネルギー転換と非エネルギー消費量の推計精度の向上は、極めて局所的・技術的な問題でありながら、非エネルギー消費量の推計精度、ひいてはエネルギー起源二酸化炭素排出量の推計精度の向上において非常に重要な位置を占める問題である。

[エネルギー起源CO₂ 排出量(MtC)] =

[エネルギー源別消費量(PJ)-非エネルギー消費量(PJ)]*[エネルギー源別炭素排出係数(kgC/MJ)]

(2) 2001 年度改訂総合エネルギー統計での状況

2001 年度改訂総合エネルギー統計においては、石油化学原料用石油製品の需給について石油等消費動態統計における化学産業の原料用石油製品の投入量を基礎として算定している。ここで、ナフサ、改質生成油などの需給量に収支差がある場合には、これを石油化学のBTX生産工程での抽出残油が石油精製に返却される「リターンナフサ」相当分であったと見なして転換部門に計上し、石油化学原料用石油製品の投入量から控除して算定を行っている。

資源エネルギー庁が石油精製業界の有識者から聴取した話では、「リターンナフサ」の量は実際には年間約 500 ～ 600 万klであるとされている。

(3) 問題点

2001 年度改訂総合エネルギー統計の算定基礎を公開した際、当該推計方法ではナフサ、改質生成油などの需給上の収支差を石油化学原料用石油製品の推計の際に用いているため、実際の石油化学原料用石油製品の需給動向や石油化学製品の生産動向と推計結果が整合しておらず、現状の推計方法はエネルギー収支の実態を正しく表現していないことが石油化学業界の有識者から指摘されたため、改善のための検討を実施した。

(4) 「ナフサ」と「改質生成油」に関する留意点

改質生成油は原油の常圧蒸留により得られる揮発油留分を、白金などの触媒下で脱水素反応させて環状炭化水素分を増加させた中間製品^{*3}である。このため、改質生成油は石油精製や貿易関係者の間では「改質ナフサ」、「リフォーメート」あるいは単に「ナフサ」と呼ばれており、エネルギー生産需給統計、日本貿易統計では改質生成油と直留ナフサは合算されて「ナフサ」として扱われている。

一方、石油等消費動態統計や化学工業統計においては、用途が異なることから、改質生成油はエチレン生産工程に用いられるナフサ(直留ナフサ)から識別して取扱われていることに注意が必要である。

本補論では、特に断らない限り狭義のナフサ(直留ナフサ)と改質生成油を識別して取扱う。

*3 改質生成油には、石油製品品質確保法による環境安全規制の対象であるベンゼンが大量に含まれており、同法におけるベンゼン濃度規制値 1 %以下の基準に適合しないため自動車用ガソリンとして出荷することができない。

3. 石油化学原料・製品に関する統計値と推計方法

(1) エチレン生産工程(分解工程)の関連統計

1) 投入側

エチレン生産工程の投入側については、ナフサ(kl)、LPG(t)、NGL・コンデンセート(kl)とも石油等消費動態統計の指定品目別消費量から投入量が推計できる。

但し、LPGの投入量にはエチレン生産以外の用途^{*4} 向が混在すること、NGL・コンデンセートについては1991～94年度迄の値が欠測していることからこれらを補正する必要がある。

2) 産出側

エチレン生産工程の産出側については、エチレン、プロピレン、ブテン・ブタン、分解ガソリンについて化学工業統計の生産量(総てt表示)から近似的に把握できる。

分解オフガス(10^3m^3)・分解重油(kl)については石油等消費動態統計の化学工業の回収・生産量から、分解LPG(t)についてはエネルギー生産需給統計のLPG需給のうち石油化学受入量から産出量が把握できる。

(2) BTX生産工程(抽出工程)の関連統計

1) 投入側

BTX生産工程の投入側については、改質生成油(kl)については石油等消費動態統計の指定品目別消費量から投入量が把握できる。

投入側の分解ガソリン(C6-8 留分)の量は何らかの方法で推計する必要がある。

2) 産出側

BTX生産工程の産出側については、純ベンゼン(t)、純トルエン(t)、キシレン(t)について化学工業統計の生産量(t表示)から近似的^{*5} に把握できる。

産出側の抽出残油、リターンナフサの量は何らかの方法で推計する必要がある。

(3) 分解ガソリンの内訳(C6-8 留分)推計方法

化学工業統計における分解ガソリンの生産量は、エチレン生産工程(分解工程)から得られるC5～C9 留分の合計量を示している。

BTXはC6-8 留分に多く含まれていることから、C5 留分はイソブレン(イソブレンゴムの原料)などの原料、C9 留分は石油樹脂などの原料として用いられており、BTX抽出工程へは投入されていない。このため、分解ガソリン生産量から、C5 留分とC9 留分相当量を控除することが可能であれば、分解ガソリンのうちBTX生産工程(抽出工程)に投入されているC6-8 留分相当量を推計することができる。

C5 留分については、C5 留分に占めるイソブレンの含有量が15～20%であることが知られており、イソブレンを重合させたイソブレンゴムは化学工業統計における「その他ゴム」の大部分を占めていることから、化学工業統計「その他ゴム」の生産量からC5 留分量を近似的に推計することが可能である。

C9 留分については、大部分が石油樹脂の原料として用いられることから、化学工業統計「石油樹脂」の生産量からC9 留分を推計することが可能である。

ここから、分解ガソリンに関する物質収支から、以下の方法で分解ガソリン(C6-8 留分)の重量を推計することができる。

*4 石油等消費動態統計における石油化学用LPG投入量と、化学工業統計におけるプロピレン・ブチレン生産量には、エチレン生産工程に関するもの以外に、石油精製工程における接触分解装置(FCC)から副生するLPGを投入してプロピレン・ブチレンを生産する工程の収支量が含まれている。

*5 化学工業統計におけるBTX関係の生産量には、コークス炉から副生した石炭系のBTXの量が含まれている(再掲)。

$$\begin{aligned} [\text{分解ガソリン(C6-8)}] &= [\text{分解ガソリン生産量}] - [\text{C5 留分推計量}] - [\text{C9 留分推計量}] \\ [\text{C5 留分推計量}] &= [\text{その他ゴム生産量}] / 0.2 \quad (\text{イソプレン含有量から近似的に推計}) \\ [\text{C9 留分推計量}] &= [\text{石油樹脂生産量}] \end{aligned}$$

(4) 抽出残油・リターンナフサの推計方法

抽出残油・リターンナフサの推計方法については、以下の3通りの方法が考えられる。
このため、次節において、以下の3通りの方法を試行してその精度を比較し評価する。

1) 総ナフサ法

ナフサ・改質生成油の各種用途への投入量(需要量)と生産量・輸入量(供給量)の残差をリターンナフサの量として推計し、当該リターンナフサと等量の抽出残油が産出されたとする方法。現在の2001年度改訂総合エネルギー統計はこの方法を採用している。

石油精製側の収支から推計を行うため、石油化学内部での抽出残油のうちエチレン生産工程用ナフサの再循環は無視することとなり、石油化学側に誤差が集積する。

ナフサ全体の残差を用いるため、石油化学用以外の発電用ナフサ、精製半製品用ナフサの需給の残差が混入する問題がある。

2) 石油化学用ナフサ法

石油化学用ナフサと改質生成油の石油化学投入量(需要量)と生産量・輸入量(供給量)の残差をリターンナフサの量として推計し、当該リターンナフサと等量の抽出残油が産出されたとする方法。

(1) 総ナフサ法同様、石油精製側の収支から推計を行うため、石油化学内部でのナフサの再循環は無視することとなり、石油化学側に誤差が集積する。

石油化学用ナフサのみの収支を考慮する点で現行の総ナフサ法より優れているが、石油化学用ナフサとそれ以外の用途間での転用や品種振替などの影響が大きければ、精度が低下する問題がある。

3) BTX産量法

BTX生産工程(抽出工程)のうち、分解ガソリン溶媒抽出法と改質生成油蒸留・溶媒抽出法では抽出残油の行先が異なることに着目し、まずBTX生産工程の物質収支から抽出残油の量を推計し、さらに分解ガソリン・改質生成油の投入比率から抽出残油のエチレン生産工程向再投入量とリターンナフサ向再投入量を推計する方法。

現実には、分解ガソリン由来の抽出残油が石油精製に投入されたり、その逆として改質生成油由来の抽出残油がエチレン生産工程に投入される場合があるが、量的に少ないこと、双方向とも量的に把握できないことから、いずれも捨象して推計を行う。

石油化学側の物質収支から推計を行い、石油化学側での抽出残油・エチレン生産の再循環も記述できるが、総ナフサ法、石油化学ナフサ法と異なりリターンナフサの量が石油化学側の物質収支から決まるため、石油精製側に誤差が集積する。

石油化学工程から直接抽出残油・リターンナフサの量を推計する点で現行の総ナフサ法より優れているが、分解ガソリンのBTX抽出工程への投入量の推計精度が全体の精度を左右する問題がある。

4. 石油化学工業の主要工程の物質収支に関する試算

(1) エチレン生産工程(分解工程)の試算結果

エチレン生産工程(分解工程)の物質収支については、投入側、産出側とも公的統計が存在するが、重量・体積が混在しているため、計量単位を重量に統一して試算した。

試算に用いた統計と重量換算に関する前提(表補5-2)と、当該統計・前提の下での、産出側

生産量推移(図補 5-4)、重量収率の評価結果(図補 5-5)を以下に示す。

エチレン生産工程(分解工程)の物質収支の試算結果は、収率 98 %前後で推移しており投入側重量と産出側重量の収支が極めて安定的に推移していることが観察される。

本推計方法においては投入側原料中の不純物の重量が考慮されていないこと、投入・産出量に石油精製の接触分解装置(FCC)からのプロピレン回収などエチレン生産工程以外の工程の原材料投入と製品産出が混在していることなどが誤差の原因と考えられる。

[表補 5-2. エチレン生産工程の物質収支の試算前提]

投入側:

ナフサ(kl) :石油等消費動態統計 実質発熱量推計法による比重 0.71 から重量換算

LPG(t) :石油等消費動態統計

NGL・コンデンサート(kl): 石油等消費動態統計 比重 0.72 とし重量換算

産出側:

エチレン(t)、プロピレン(t)、ブテン・ブタン(t): 化学工業統計

分解ガソリン(t):化学工業統計

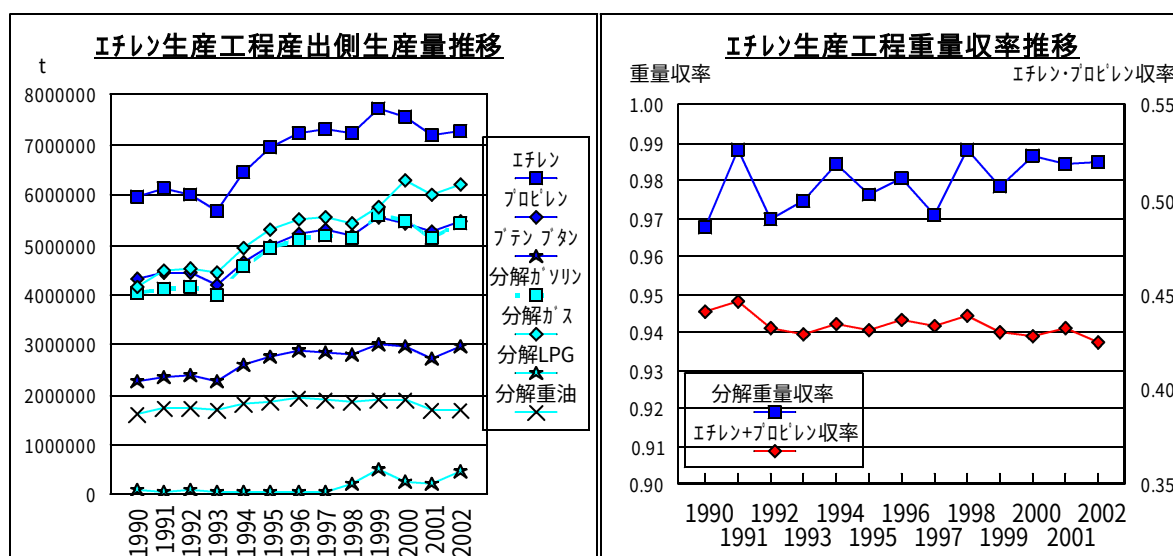
分解重油(kl) :石油等消費動態統計 アスファルト比重 1.025 を仮定し重量換算

分解LPG(t) :エネルギー生産需給統計

分解オフガス(10³m³): 石油等消費動態統計 比重 0.82t/m³ を仮定し重量換算

重量収率 = 産出側重量合計/投入側重量合計

[図補 5-4.エチレン生産工程(分解工程)の産出側生産量推移、図補 5-5.エチレン生産工程重量収率推移]



(2) BTX生産工程(抽出工程)の試算結果

BTX生産工程(抽出工程)の物質収支については、投入側、産出側の一部にしか公的統計が存在せず、また重量・体積が混在しているため、判明している統計値の計量単位を総て重量に統一し、3-(4)で述べた3通りの方法で推計することにより試算を行った。

残念ながら、分解ガソリン溶媒抽出法、改質生成油蒸留・溶媒抽出法を区別した統計はないため、2つの方式の合計量に関する物質収支を試算した。

試算に用いた統計と重量換算に関する前提(表補 5-3)、当該統計・前提の下での産出側生産量推移(図補 5-6)、重量収率の評価結果(図補 5-7)を以下に示す。

BTX生産量と抽出残油の生産量については、石化ナフサ法、BTX産量法では正の相関が見られるが、総ナフサ法では両者に明確な相関は見られない結果となる。

次に、BTX生産工程の重量収率の推計値を見た場合、総ナフサ法、石油化学ナフサ法では産出量([BTX生産量]+[抽出残油生産量])と投入量([改質生成油投入量]+[分解ガソリン(C6-8)投

入量]の関係が不安定であり、時系列で観察した場合、推計期間のほぼ全期間で物質収支が全く成立していないことが観察される。

一方、BTX産量法では他の方法とは逆に、BTX生産工程の物質収支から抽出残油の量を求めているため、原理的に重量収率は必ず 100 %となり物質収支は成立する。

改質生成油や分解ガソリン(C6-8 留分)中のBTX含有量が大きく変動するとは考えにくいこと、BTX生産量の統計精度は極めて高いと考えられること、BTX生産工程は単純な蒸留・溶媒抽出などで構成されていることなどのBTX生産工程に関する技術的知見から考察して、BTX生産工程に関する物質収支の推計は、BTX産量法により行うことが妥当であると評価できる。

[表: 補 5-3. BTX生産工程の物質収支の試算前提]

投入側:

改質生成油(kl) :石油等消費動態統計 ナフサ比重 0.71 から重量換算
分解ガソリン(C6-8)(t) :化学工業統計 分解ガソリンの生産量から、他ゴム生産量の 5 倍(イソ
ブレン収率 0.2 と仮定:C5 相当量)、石油樹脂生産量(C9 相当量)を控除

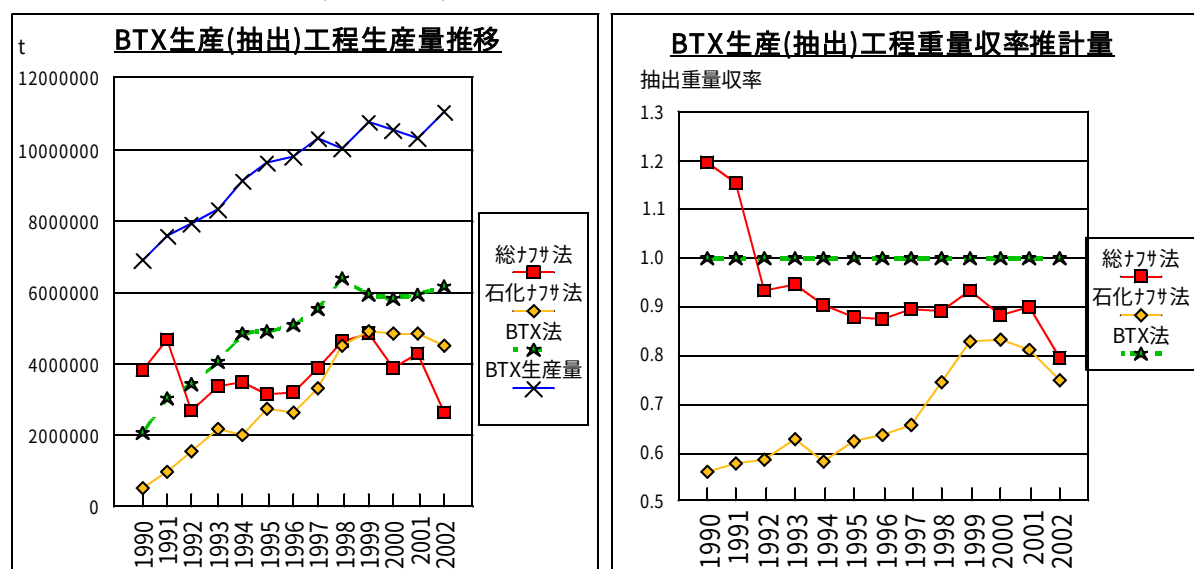
産出側:

純ベンゼン(t)～キシレン: 化学工業統計 (非石油系の生産量分は無視)

抽出残油: 総ナフサ法、石油化学ナフサ法、BTX産量法により試算

収率 = 産出側重量合計/投入側重量合計

[図補 5-6.BTX生産工程(抽出工程)の産出側生産量推移、図補 5-7.BTX生産工程重量収率推移]



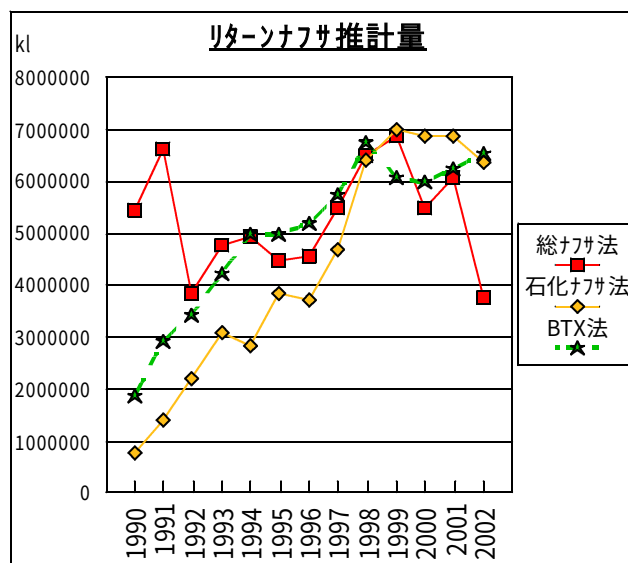
(3) 「リターンナフサ」の推計に関する量的比較

資源エネルギー庁が石油精製業界の有識者から聴取した情報では、リターンナフサの量は年間約 500 ～ 600 万klであると言われている。

4-(2) で試算・評価した石油化学のBTX生産工程(抽出工程)の物質収支から抽出残油の体積を逆算し、BTX生産工程(抽出工程)への分解ガソリン・改質生成油の投入比率からリターンナフサの産出量を推計した結果と、参考までに総ナフサ法、石油化学ナフサ法でのリターンナフサの産出量を推計した結果を示す(図補 5-8)。

リターンナフサの推計結果は、いずれの方式においても資源エネルギー庁による聴取結果と概ね一致する結果となっているが、推計過程において石油化学工程での物質収支と矛盾がないことが確認されているBTX産量法を用いてリターンナフサの推計を行うことが妥当と考えられる。

[図: 補 5-8. リターンナフサの推計結果推移]



5. 物質収支の評価結果と総合エネルギー統計への反映

(1) 物質収支の評価結果と総合エネルギー統計への反映

石油化学の主要工程における物質収支の試算結果を取りまとめた評価結果は以下のとおり。

1) エチレン生産工程

エチレン生産工程における物質収支については、関連する統計からの推計により概ね収支が成立しかつ安定的に推移していることが確認された。

従って、エチレン生産工程(分解工程)の物質収支については、現行どおり転換部門中 #2620 石油化学 のうち#2622 分解ガス・分解重油生成 で表現することが妥当であることが検証された。

2) BTX生産工程

BTX生産工程における物質収支については、抽出残油・リターンナフサの推計を現行の総ナフサ法からBTX産量法に改訂することにより物質収支に関する推計精度が改善し、推計過程で石油化学工程での物質収支と矛盾のない推計量が得られることが示された。

現状の 2001 年度改訂総合エネルギー統計においては、BTX生産工程(抽出工程)の物質収支について転換部門中 #2620 石油化学 のうち#2621 リターンナフサ において総ナフサ法での試算結果を表記しているが、化学工業統計を補助的に用いたBTX産量法で表現することが妥当であると考えられるため、関連部分を#2621 抽出残油・リターンナフサと名称変更する。

(2) その他の提言事項 - 統計概念の共通化(標準化)と再確認

本稿における作業の結果、総合エネルギー統計において、石油精製、石油化学に関連する統計の各部分に解釈を与える際に、用語の定義が不明瞭であることが大きな障害となっていることが再認識された。

「ナフサ」「改質生成油」「リターンナフサ」やその受取・払出などの重要な概念については、関係する各業界や関係する各統計間での定義の共通化(標準化)と再確認が必要であり、こうした取組みをさらに進めていくことが必要である。