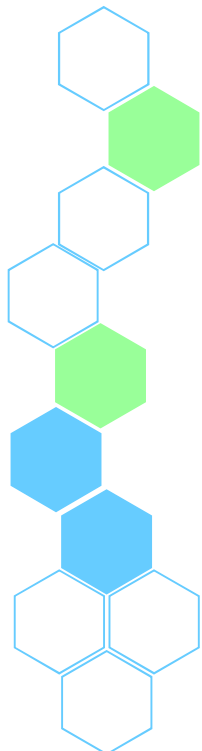




持続可能な航空燃料 (SAF) の 品質規格と試験

2023年5月
一般社団法人 日本海事検定協会



目次

	ページ		ページ
1. SAF導入の取り組み			
1.1 背景	3	3.4.5 炭化水素組成	18
1.2 ICAO（国際民間航空機関）のCO2排出量削減目標	4	3.4.5.1 炭化水素組成 – Jet A-1とニートSAFの比較	19
2. SAFの品質と規格		3.4.5.2 炭化水素組成 の試験方法	20
2.1 SAFと従来燃料の関係	5	3.4.6 炭素および水素	21
2.2 ASTM D7566 – SAFの試験規格と認証の仕組み	6	3.4.7 窒素分	21
2.1.1 ASTM D7566で規定された合成燃料	7	3.4.8 水分	21
2.1.2.1 国産SAF … FT-SPK	8	3.4.9 金属	22
2.1.2.2 国産SAF … HEFA-SPK	9	3.4.10 ハロゲン	23
2.1.2.3 国産SAF … ATJ-SPK, CHJ, HC-HEFA SPK	10	4. 混合SAFの品質規格 ASTM D7566 Table 1	
3. ニートSAFの品質規格 (ASTM D7566) Annex A1~A7		4.1 ASTM D7566 Table 1の要求事項	24
3.1 ニートSAFの品質要求事項	11	4.2 Table 1 Part 1	25
3.2 Detailed Batch Requirements (詳細バッチ要求事項)	12	4.2.1 ASTMD7566 Table 1 とDEF STANの違い	26
3.3 Other Detailed Requirements (その他の詳細要求事項)	13	4.3 Table 1 Part 2	27
3.4 ニートSAF特有の試験項目	14	4.3.1 Table 1Part 2 : Extended Requirementsの緩和条件	28
3.4.1 蒸留傾斜 (T90-T10, T50-T10)	15	4.4 混合SAF特有の試験項目	29
3.4.2 ガスクロ蒸留	16	4.4.1 密度	30
3.4.3 脂肪酸メチルエステル (FAME)	17	4.4.2 芳香族 (下限値)	31
3.4.4 熱安定度 (325°C) JFTOT	17	4.4.3 蒸留傾斜 (T90-T10, T50-T10)	32
		4.4.4 潤滑性試験 (BOCLE)	33
		4.4.5 動粘度 (-40°C)	34
		4.4.5.1 動粘度の温度依存性	35
		5. 関連規格等	36

1. SAF導入の取り組み

1.1 背景

SAF（持続可能な航空燃料）の活用を通じた温室効果ガス排出量削減の試みが、国内外の航空産業で進められている。

- 日本国内の目標
2030年に本邦航空会社の燃料の10%をSAFに置き換える。（国土交通省 2021年12月）
2030年時点の国内SAF利用見込み（本邦＋外航）は、171万kLと試算されている。
- 航空業界のCO2排出量削減の手段
CO2排出量削減の手段として注目されている主なものは、以下の4つである。SAF活用の利点は既存航空機をそのまま使用しつつ排出量を削減できる点である。
 - ①新技術の導入（新しいタイプの航空機の開発等）
 - ②運航方式の改善
 - ③SAFの活用
 - ④市場メカニズムの活用（CORSIA^{*1}によるカーボンオフセット等）

上記①～③は実際に排出量削減を目指すものだが、削減目標に達しなかった場合には、④の市場メカニズムによりオフセットする。

*1 CORSIA

「国際民間航空のためのカーボン・オフセット及び削減スキーム（CORSIA：Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation）」とは、ICAOにより導入されたカーボン・オフセットのための制度である。参加各運航会社には定められたルールに沿って必要量の二酸化炭素排出枠を購入しオフセットする義務が課される。CORSIAの運用は2021年に始まり、2027年には免除対象国を除いて全てのICAO加盟国に参加が義務付けられる。

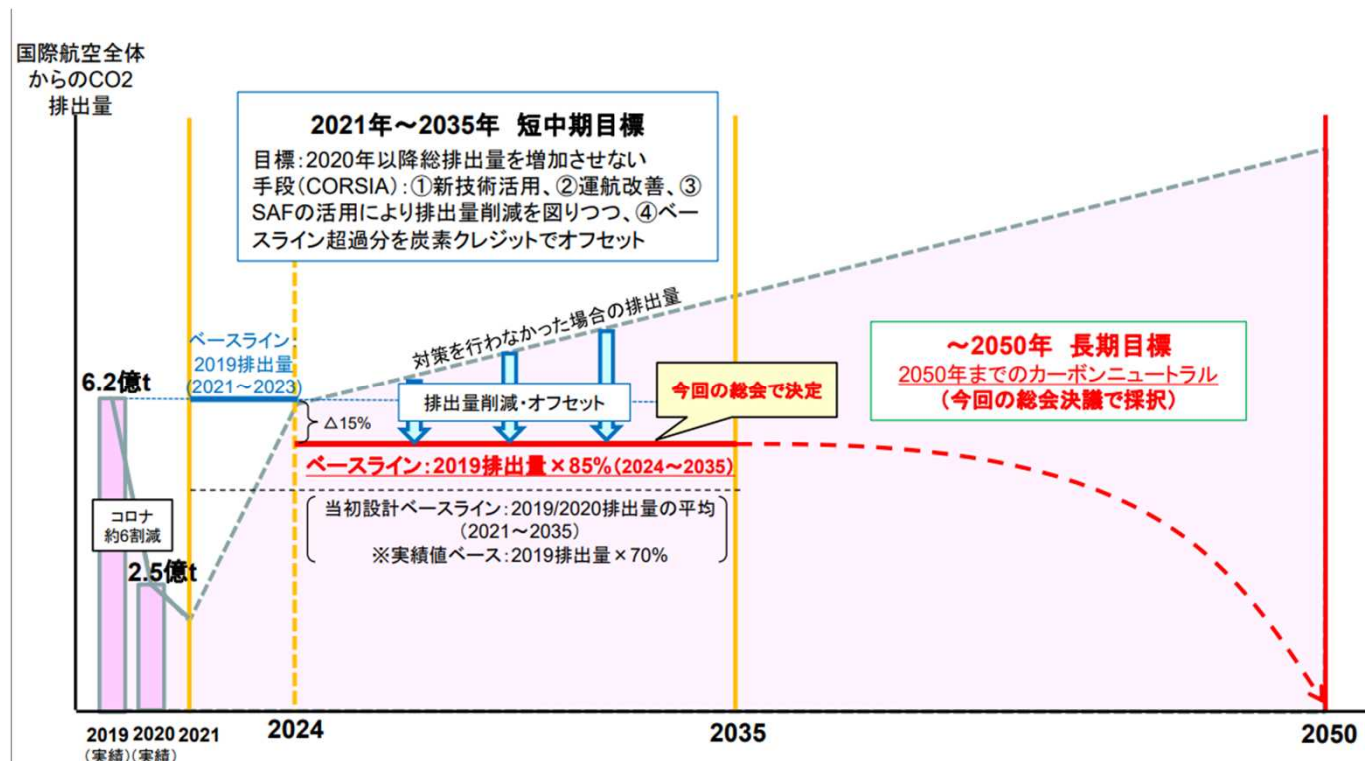
1. SAF導入の取り組み

1.2 ICAO（国際民間航空機関）のCO₂排出量削減目標

ICAOは2010年総会で2020年以降CO₂排出量を増やさないことを目標として設定した。（その後、COVID 19の影響を勘案してベースを2019年・2020年の排出量平均値に変更）

さらに、2022年10月第41回総会で、2050年までのカーボンニュートラルを目指すことが宣言され、2035年までのカーボン・オフセットのベースラインが2019年比85%と決定された。

ICAO加盟国の航空会社は、2035年までに、上述の①～③の手段でベースラインまでCO₂排出量を削減するよう努力し、超過分は④の市場メカニズムでオフセットしなければならない。



第41回 ICAO総会における環境関係の決定概要（2022年10月）

国土交通省航空局 第2回 SAFの導入促進に向けた官民協議会 説明資料（2022年11月7日）から転載

2. SAFの品質と規格

2.1 SAFと従来燃料の関係

SAFとは

SAFはバイオマスや再生原料等を原料として製造される合成燃料*1である。合成燃料がGHG削減効果のあるSAFとして認められるためには、「CORSA適格燃料（CEF）」として登録・認証を得る必要がある。

化学的性質

SAFの構成成分は従来ジェット燃料と同じく炭化水素であり、ケロシンタイプの燃料に類似した性状を目標として合成される。しかし、合成燃料の炭化水素組成や沸点範囲は完全に従来燃料と同じではない。また、SAFとして使用するためにはJet A-1等の石油系従来燃料と混合する必要がある。

呼称

一般には、合成燃料100%をニートSAF、従来燃料と混合したものをSAF（あるいは混合SAF）と呼ぶ。本報告書では、従来燃料と混合した燃料をニートSAFと区別するために混合SAFと呼ぶ。

SAF関連の燃料の呼称

規格・指針	合成燃料100%	既存ジェット燃料と合成燃料を混合したもの
本報告書での呼称	ニートSAF	混合SAF
ジェット燃料取扱基準に関する指針（石連指針）	合成ブレンド成分	合成燃料ブレンド品
持続可能な代替航空燃料（SAF）の取扱い要綱 初版（石油連盟発行）	ニート燃料	SAF
Defense Standard 91-091	合成ブレンド成分（SBC）	航空タービン燃料（SAFとしての呼び名は無い）
ASTM D7566	合成ブレンド成分（SBC）	航空タービン燃料
EI 1533	合成ブレンド成分（SBC）	半合成ジェット燃料
その他の呼称 EI 1533で紹介されている呼称	ニートSAF	SAF 合成航空燃料（SAF） SAFブレンド 合成ジェット燃料ブレンド

*1 合成燃料は天然ガス等の化石由来原料からも製造できるため、合成燃料の全てがSAFと完全に同義ではない点に注意する必要がある。

2. SAFの品質と規格

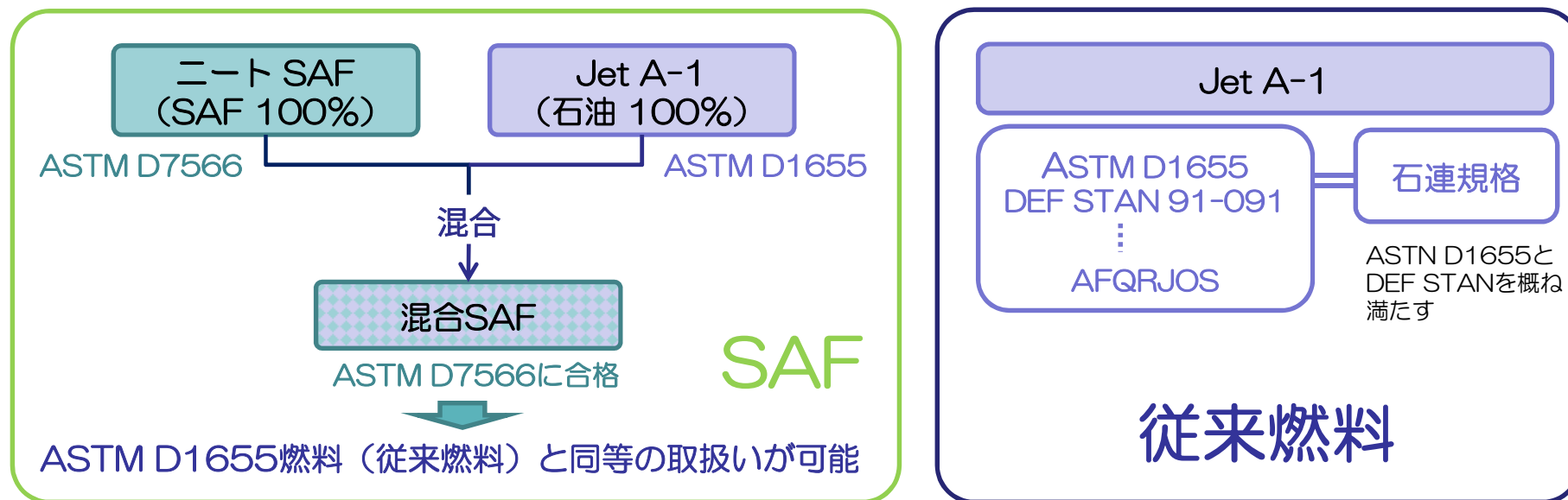
2.2 ASTM D7566 – SAFの試験規格と認証の仕組み

航空燃料の品質規格は、Defence Standard 91-091 (DEF STAN) , ASTM D1655 等であり、日本国内ではこれらを概ね満たす共同利用貯油施設向け統一規格 (石連規格) が使用されている。

一方、SAFを含む合成燃料の品質規格は、ASTM D7566に規定されている物のみである (2023年5月現在)。

ASTM D7566 では、ニートSAFと混合SAFの両方について品質規格を定めている。

ニートSAFは、従来燃料と混合後にASTM D7566の規格に合格することにより、ASTM D1655適合燃料と見做すことができ、従来燃料と同様に取り扱うことができる (ASTM D1655への自動認証)。



SAFと従来燃料の規格の関係

2. SAFの品質と規格

2.1.1 ASTM D7566で規定された合成燃料

ASTM D7566で使用が認められている合成燃料は、以下の7種類である（2023年現在）。品質規格は、D7566の附属書 Annex A1～A7に規定されている。また、各々の燃料を従来燃料と混合する際の上限（容量%）も規定されている。これらが所謂ニートSAFとして利用される。

国内では、5種類（赤枠内）の燃料について製造実績があるため、以後はこれらについて解説する。

ANNEX 番号	種類	概要	原料の例	従来燃料との 混合上限
A1	FT-SPK	バイオマスをガス化，FT合成	木質セルロース， 都市ゴミ	50 容量% ※
A2	HEFA SPK	油脂および脂肪酸の水添	廃食油等の油脂	50 容量% ※
A3	SIP	糖由来合成イソパラフィン	バイオマス糖	10 容量% ※
A4	SPK/A	非化石由来芳香族をアルキル化	非石油由来芳香族	50 容量% ※
A5	ATJ	アルコール水添	サトウキビ、トウモロコシ 都市ゴミ（衣料等） 木質	50 容量%
A6	CHJ	微細藻類および廃食油を水素化熱水分解	微細藻類および廃食油	50 容量%
A7	HC-HEFA SPK	微細藻類由来炭化水素を水添	微細藻類抽出油	10 容量%

※燃料の密度や芳香族含有率等の性状によっては、混合率が規定の上限未満に制限されることがある。

2. SAFの品質と規格

2.1.2.1 国産SAF

日本国内でこれまでに製造利用された実績のあるSAFは，ASTM D7566のAnnex A1，A2，A5，A6，およびA7の燃料である。これらの燃料の定義は単に原料の化学的分類と製造法の概要を指定しているのみであり，原材料名や詳細な合成条件は示されていない。

Annex A1：FT-SPK（フィッシャー・トロプシュ合成ケロシン）

- フィッシャー・トロプシュ（FT）プロセスは，合成ガス，すなわち一酸化炭素（CO）と水素（H₂）を鉄またはコバルトベースの触媒を使用して液体炭化水素を合成するプロセスである。航空燃料として適切な蒸留範囲と化学組成を持つ製品に転換するためには，さらに分解と水素化処理等を行う必要がある。
- ASTM D7566 Annex A1 では合成ガス等を原料として指定しているが，合成ガスの発生源は指定していないため，技術的には様々な原料が利用可能である。原料は固体でも液体でもよい。例としては，都市廃棄物や林業副産物がある。FT合成自体は元来，石炭や天然ガスからジェット燃料を生産することを想定したものである。したがって，ASTM D7566の燃料は必ずしもSAFでない場合があり得ることになる。
- 合成プロセスの生成物は，ノルマルパラフィン以外にも含酸素化合物とオレフィンの混合物が含まれるため，水素化処理，水素化分解または水素化異性化等の処理によって精製され，最終製品となる。
- FTプロセスで製造されたニートSAFは，主としてイソパラフィンとノルマルパラフィンで構成されており，芳香族を含まない。このため，混合SAFを製造する際にブレンド率の上限が，規格で許容される上限（50容量%）未満に制限される場合がある。

2. SAFの品質と規格

2.1.2.2 国産SAF

Annex A2 : HEFA-SPK (HEFA合成ケロシン)

- HEFA-SPK は、エステルおよび脂肪酸を水素化処理して製造される。現在商用利用されている SAFの主要な原料となっている。これは、HEFA-SPKの製造方法がHVOなどの既に普及している合成ディーゼル燃料の製造方法と類似していることによる。
- 原料は単に脂肪酸エステルまたは遊離脂肪酸としてのみ定義されている。エステルとしては、油脂等のグリセリド類や脂肪酸メチルエステル (FAME) 等が想定される。原料の具体的な供給源は指定されていないため、化学的に脂肪酸または脂肪酸エステルであれば良い。脂肪酸エステル、遊離脂肪酸、植物油、動物油脂、使用済み食用油、藻類由来の油など様々なものが利用できる。
- 一般に使用される原料のほとんどは炭化水素鎖がC18とC20を主体とするものである。一方、従来型ジェット燃料は、通常C8～C16の炭化水素で構成されている。従来型ジェット燃料に近い組成とするためには、脂肪酸/エステル原料を分解/異性化して、炭化水素鎖を調整する必要がある。
- HEFAから製造されたニートSAFは、FT-SPKと同様に、主としてイソパラフィンとノルマルパラフィンで構成されており、芳香族を含まない。このため、混合SAFを製造する際にブレンド率の上限が、規格で許容される上限 (50 容量%) 未満に制限される場合がある。

2. SAFの品質と規格

2.1.2.3 国産SAF

ANNEX A5 – ATJ-SPK (–アルコールtoジェット)

- 附属書Annexで定義されたプロセスはいくつかのアルコールに使用できるが、2023年時点ではエタノールとイソブタノールを原料として個別に使用することしか許可されていない。
- アルコール供給源には制限はないが、典型的な原料はデンプン/砂糖（トウモロコシ、サトウキビ、芋類）等であり、使用済み衣類等も利用できる。これらを発酵して糖からアルコールに転換し、脱水後にオリゴマー化プロセスを通じてより長鎖の物質に合成する。ここで得られた中間原料は、水素化後に蒸留によってジェット燃料の分子量範囲に分留される。

ANNEX A6 – CHJ (接触水素化分解ジェット燃料)

- 廃油の処理に由来する清浄な遊離脂肪酸を使用する。脂肪酸は予熱した水と結合し、接触水素熱分解ユニット内で高温高圧下で処理される。
- 得られた混合物は、水素化処理、水素化分解、異性化などの従来型精製プロセスで処理されるが、非常に広い沸点範囲を持つ分子が生成するため、さらに分留が行われる。
- CHJには芳香族が含まれている。これにより混合SAFは従来ジェット燃料と類似した組成となり、良好な析出点や芳香族下限値が担保される。

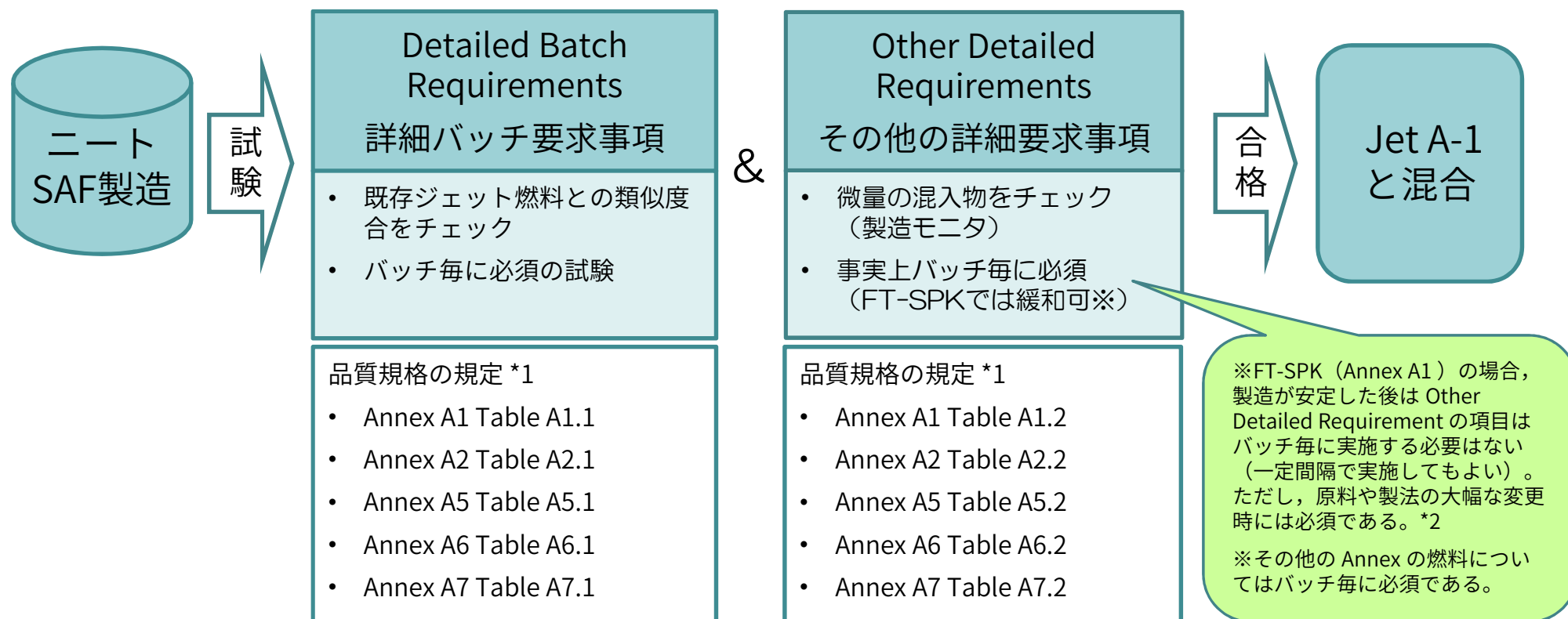
Annex A7 – HC-HEFA SPK (水素化炭化水素HEFA)

- HEFA ベースの製品であるが、特定の藻類株（Botryococcus braunii 種）に由来する水素化処理された脂肪酸エステル、脂肪酸、および炭化水素を含む独自の原料を利用する。
- この燃料は日本で開発され、ASTM D4054 プロセスに従って「ファストトラック」承認（迅速承認）を取得した最初の燃料である。混合上限は最大 10 容量% である。

3. ニートSAFの品質規格 (ASTM D7566) Annex A1~A7

3.1 ニートSAFの品質要求事項

- ニートSAFは、既存ジェット燃料に類似していることが要求される。
- 既存燃料とは製法が異なるため、微量の混入物もチェックされる。
- 製品は、以下の二段階の品質要求事項を満たす必要がある。



*1 Annex A3, Annex A4 についても品質規格が存在するが、国内製造実績および利用の計画がないため省略した。

*2 Annex A1 (FT-SPK) は合成燃料としての歴史が古く知見の蓄積が十分であるため、Other Detailed Requirementはバッチ毎ではなく変更管理の目的で実施してもよいとされている。他のAnnexの燃料については、緩和の規定は無いが、今後十分に知見が蓄積されれば、緩和される可能性がある。

3. ニートSAFの品質規格 (ASTM D7566) Annex A1~A7

3.2 Detailed Batch Requirements (詳細バッチ要求事項)

ASTM D7566の各Annex の Table Ax.1に規定 (xは Annex番号)

●: 既存燃料で通常実施しない項目

試験項目	Annex A1	Annex A2	Annex A5	Annex A6	Annex A7	試験方法 (斜体はReferee method)
	Table A1.1	Table A2.1	Table A5.1	Table A6.1	Table A7.1	
	FT-SPK	HEFA-SPK	ATJ-SPK	CHJ	HC-HEFA SPK	
酸価, mg KOH / g	0.015以下					D3242 / IP 354
蒸留 (物理蒸留)						D86, IP 123, D7344, D7345
T10, °C	205以下					
T50, °C	報告					
T90, °C	報告					
終点, °C	300以下					
T50-T10, °C				15以上		
T90-T10, °C	22以上	22以上	21以上	40以上	22以上	
残油量, %	1.5以下					D2887 / IP 406
減失量, %	1.5以下					
蒸留 (ガスクロ蒸留)						
T10, °C	報告					
T20, °C	報告					
T50, °C	報告					
T80, °C	報告					
T90, °C	報告					
終点, °C	報告					
引火点, °C	38以上					
密度 (15°C), kg/m ³	730~770	730~772	730~770	775~840	730~800	D1298 / IP 160, D4052, IP365
析出点, °C	-40以下					D5972 / IP 435, D7153 / IP 529, D7154 / IP 528, D2386 / IP 16
煙点, mm						D1322 / IP 598
実在ガム, mg /100 mL						D381 ^{*2} , IP 540
FAME, mg/kg		5未満		5未満	5未満	IP 585, IP590
熱安定度						D3241 / IP 323
温度, °C	325以上 ^{*1}					
フィルタ差圧, mmHg	25以下					
管堆積度(VTR) または 管堆積度(ITR, ETR)	3未満, 孔雀模様や異常色相堆積物なし 85以下					

Annex A3, A4は, 国内利用実績が無いため省略

*1 既存ジェット燃料では260°C以上とされているが, ニートSAFの場合はより高い温度で試験しなければならない。

*2 ASTM D381は ASTM D7566-20 Annex A6 ではreferee method とされていない。

3. ニートSAFの品質規格 (ASTM D7566) Annex A1~A7

3.3 Other Detailed Requirements (その他の詳細要求事項)

●: 既存燃料
で通常実施し
ない項目

ASTM D7566の各Annex の Table Ax.2に規定 (xは Annex番号)

試験項目	Annex A1	Annex A2	Annex A5	Annex A6	Annex A7	試験方法 (斜体はReferee method)
	Table A1.2	Table A2.2	Table A5.2	Table A6.2	Table A7.2	
	FT-SPK	HEFA-SPK	ATJ-SPK	CHJ	HC-HEFA SPK	
● 炭化水素組成						
● シクロパラフィン, 質量%	15以下	15以下	15以下	報告	50以下	D2425
● パラフィン, 質量%	報告	報告	報告	報告	報告	D2425
● 芳香族, 質量%	0.5以下	0.5以下	0.5以下	8.4~21.2	0.5以下	D2425,
芳香族, 質量%または				8.4~21.2		D6379 / IP 436
芳香族, 容量%				8~20		D1319 / IP 156
● 炭素および水素, 質量%	99.5以上					D5291
● 非炭化水素組成						
● 窒素, mg/kg			2以下			D4629 / IP 379
● 水分, mg/kg			75以下			D6304, IP438
● 硫黄, mg/kg			15以下			D5453, D2622
● 金属, mg/kg Al, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li,* Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Pd, Pt, Sn, Sr, Ti, V, Zn			0.1以下 (各金属)			D7111, UOP 389
● ハロゲン, mg/kg			1以下			D7359

*LiはAnnex A6, A7では不要
Annex A3, A4は, 国内利用実績が無いため省略

3. ニートSAFの品質試験項目 (ASTM D7566) Annex A1~A7

3.4 ニートSAF特有の試験項目

各Annexに設定された試験項目のうち、ニートSAF特有の試験について解説する。

Detailed Batch Requirements (詳細バッチ要求事項)

試験項目	規定
• 蒸留傾斜 (T90-T10)	→ Table A1.1~Table A7.1
• 蒸留傾斜 (T50-T10)	→ Table A6.1
• ガスクロ蒸留	→ Table A1.1~Table A7.1
• 脂肪酸メチルエステル	→ Table A2.1, A6.1, A7.1
• 熱安定度 (試験温度 325°C以上)	→ Table A1.1~Table A7.1

Other Detailed Requirements (その他の詳細要求事項)

試験項目	規定
• 炭化水素組成	→ Table A1.2~Table A7.2
• 炭素および水素	
• 窒素	
• 水分	
• 金属	
• ハロゲン	

3. ニートSAFの品質規格 (ASTM D7566) Annex A1~A7

3.4.1 蒸留傾斜 (T90-T10, T50-T10)

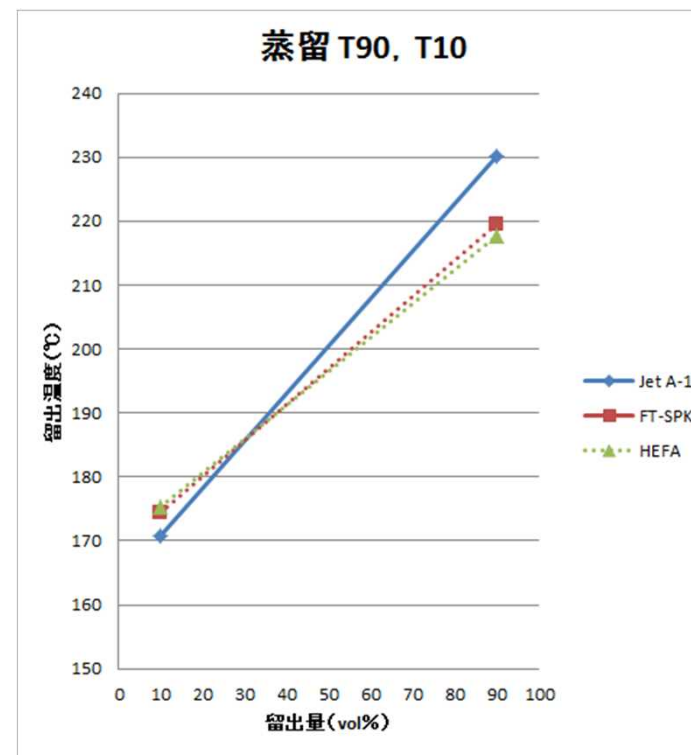
ジェット燃料は適切な揮発性をもつ必要があるため、蒸留範囲の規格が定められている。SAFの場合、製造方法によっては蒸留範囲が既存ジェット燃料より狭いことがある。

SAFの蒸留範囲を従来ジェットとなるべく類似させるために、品質規格で蒸留の温度傾斜T90-T10 (90%留出温度と10%留出温度の差) を40°C以上とするよう規定されている。Annex A6 (CFJ) についてはT90-T10に加えてT50-T10も規定されている。

図は、SAFとJet A-1について、蒸留曲線を簡略化してT10およびT90のみ示したものである。Jet A-1と比較して、FT-SPK (Annex A1) , ATJ (Annex A5) の蒸留傾斜がやや狭いことがわかる。ただし、品質規格を満たしているため問題は無い。

蒸留傾斜の規格値

項目	規格値	Jet A-1通常値
T50-T10 ※Annex A6のみで必要	15°C以上	12~30°C
T90-T10	40°C以上	35~75°C



蒸留傾斜 SAFと Jet A-1の比較

留出温度のうちT90, T10のみ図示した。FT-SPK (Annex A1) , HEFA-SPK (Annex A2) は、Jet A-1と比較して温度傾斜が緩い。ニートSAFとJet A-1を混合することにより、温度傾斜の違いは緩和される。

3. ニートSAFの品質規格 (ASTM D7566) Annex A1~A7

3.4.2 ガスクロ蒸留 Simulated distillation

ニートSAFについては通常の常圧蒸留（物理蒸留）に加えてガスクロ蒸留が必要である。

ガスクロ蒸留は、常圧蒸留とは異なり真沸点（True Boiling Point）が得られる。常圧蒸留とは値が一致しないが、微妙な蒸留性状の変化を検出するのに有利である。ニートSAFのガスクロ蒸留は、蒸留性状の取得というより、製造モニタの目的で実施される。規格値は設定されていない。

※ガスクロ蒸留

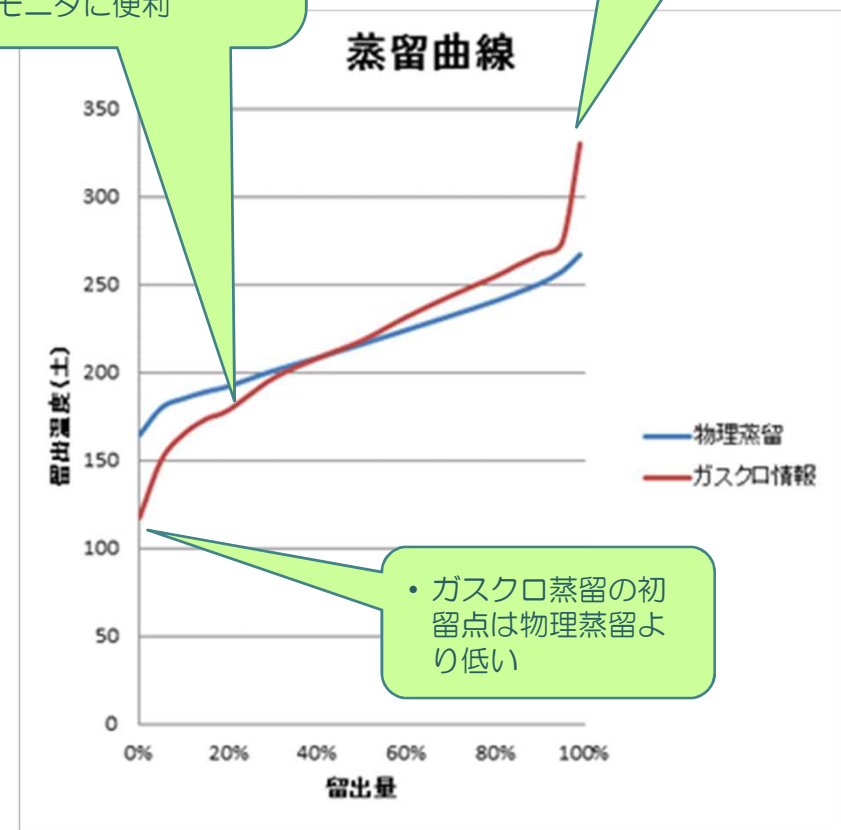
ガスクロマトグラフィーで疑似的に蒸留データを求める手法である。前もって沸点が分かっている複数の標準物質を分析し、保持時間と沸点の関係を求めておくことにより、ガスクロ分析で得られたクロマトグラムを蒸留データに変換できる。

物理蒸留と比較すると、初留点はより低く、終点はより高いが、50%付近の温度は大きく変わらない場合が多い。物理蒸留の代替法として使用する場合は、変換式で物理蒸留相当の値に補正する必要がある。

ただし、ニートSAFの場合は物理蒸留へ変換せずに報告することになっている。

- ガスクロ蒸留は真沸点分布のため、曲線のアップダウンが細かい
- 成分変動が反映されやすいため、モニタに便利

- ガスクロ蒸留の終点は物理蒸留より高い



ガスクロ蒸留と物理蒸留の比較

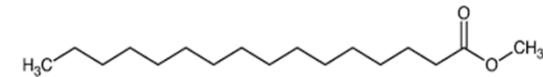
3. ニートSAFの品質規格 (ASTM D7566) Annex A1~A7

3.4.3 脂肪酸メチルエステル (FAME)

FAMEや脂肪酸，油脂等を原料とするニートSAF (Annex A2, A6, A7) についてはFAME濃度を測定しなければならない。

なお，FAMEは既存ジェット燃料 (Jet A-1) でも測定する可能性があるが，これはサプライチェーンの過程でバイオディーゼル燃料が混入する可能性がある場合に限って必要とされる。

- 試験方法： IP 585 (GCMS法) または IP590 (HPLC蒸発光散乱検出法)
- 規格値：5 mg/kg 未満



FAME分子の例
(実際はさまざまな分子の混合物である)

FAMEは，炭化水素ではなくエステル化合物であり，分子中にエステル結合をもつ。FAMEは軽油に数%混合して使用されている軽油代替燃料 (バイオディーゼル燃料) の一種である。

3.4.4 熱安定度 (JFTOT) Thermal Stability

JFTOTは既存ジェット燃料 (Jet A-1) についても実施する試験であるが，必要に応じて試験温度が変更される。ニートSAFの場合はJet A-1より高い試験温度で実施しなければならない。値の評価や規格値はJet A-1と同様である。

- 試験方法： D3241 / IP 323
- 試験温度： 325°C以上 (Jet A-1の場合は 260°C以上)
- 規格値： 管堆積度 < 3 (孔雀模様や異常色相堆積物なし) ，フィルタ差圧 25 mmHg 以下

3. ニートSAFの品質規格 (ASTM D7566) Annex A1～A7

3.4.5 炭化水素組成 Hydrocarbon composition

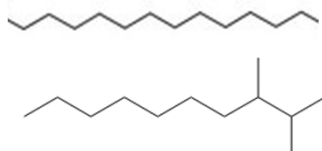
ジェット燃料を構成する炭化水素は、パラフィン、シクロパラフィン、芳香族である。従来ジェット燃料ではこれらが各々一定程度含まれている。組成は燃料の燃焼性や発熱量に関連している。

一方、SAFはほぼパラフィンのみで構成されており、芳香族、シクロパラフィンが殆ど含まれない傾向がある^{*1}。ニートSAFを従来ジェット燃料と混合使用する理由の一つは、このようなSAF特有の炭化水素組成を、従来ジェット燃料のそれになるべく近づけることである。

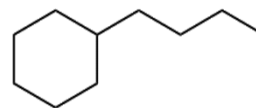
ニートSAFの組成に関する規格値は、燃料の性質に応じて各々の標準的な範囲に設定されている。

炭化水素組成の規格値

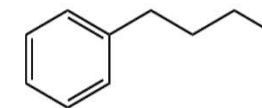
ニートSAF種類		パラフィン	シクロパラフィン	芳香族
規格値	Annex A1, A5, A7	報告	15 質量%以下	0.5 質量%以下
	Annex A6	報告	報告	8.4～21.2 質量% (8～20 容量%)
参考：燃焼性の評価		最も望ましい燃焼特性の成分	パラフィンの次に望ましい成分	煤を生じるため燃焼上は望ましくないが、燃料漏れ防止のため一定以上は必要な成分



パラフィン
Paraffin



シクロパラフィン
Cycloparaffin



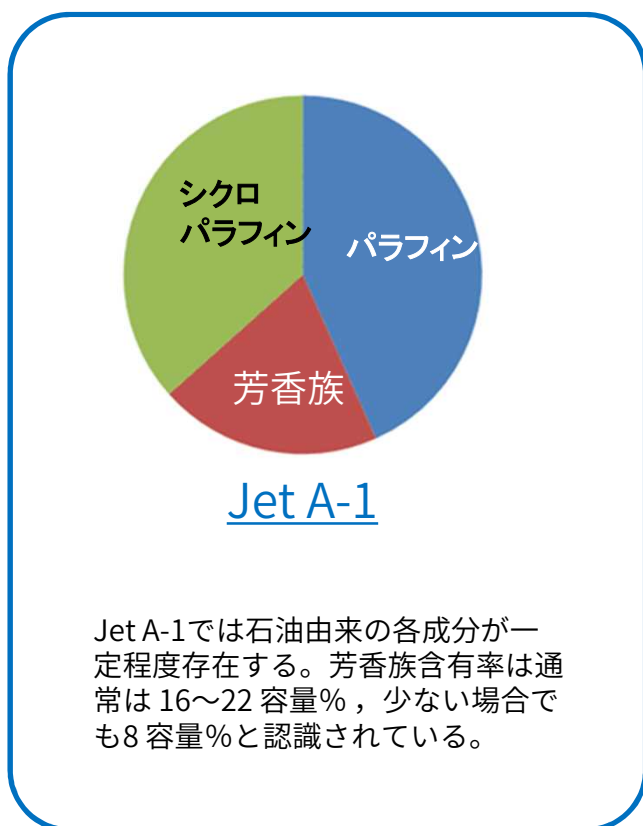
芳香族
Aromatics

*1 Annex A6 のCFJは芳香族を含み、従来燃料に類似している。

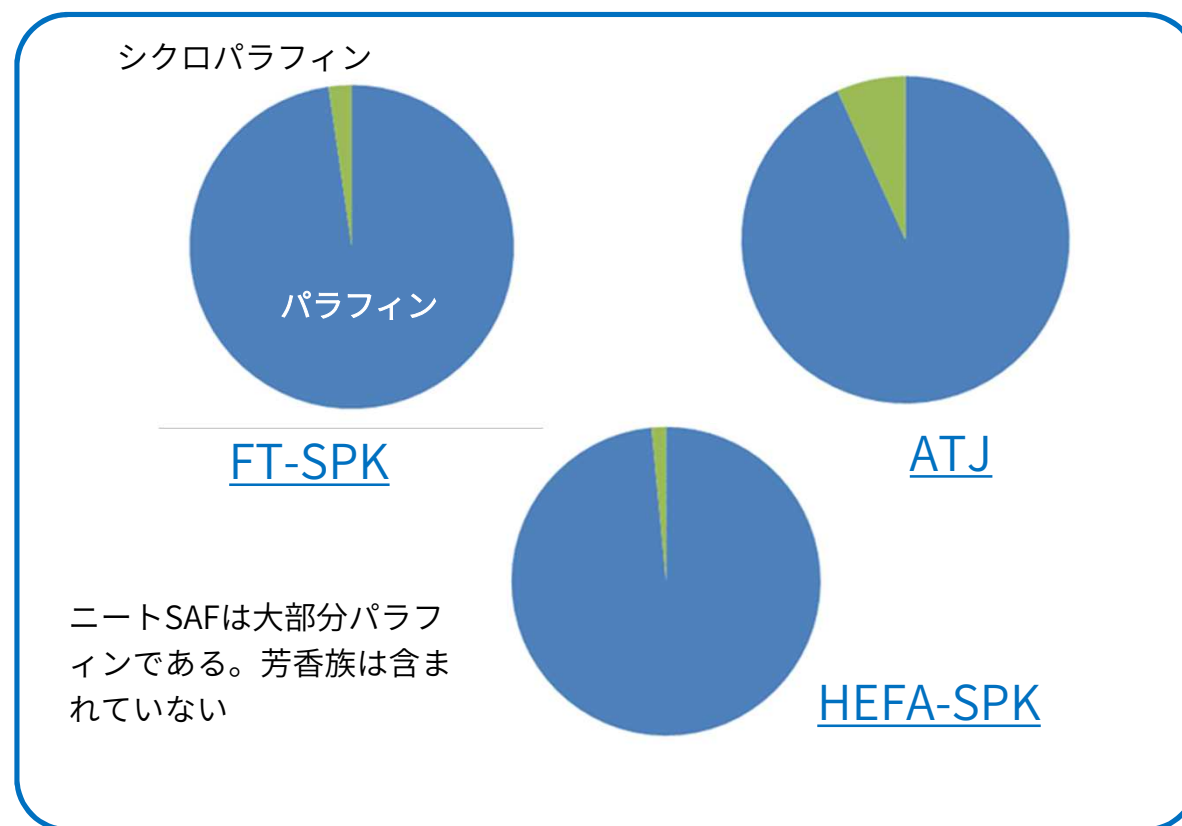
3. ニートSAFの品質規格 (ASTM D7566) Annex A1~A7

3.4.5.1 炭化水素組成 – Jet A-1とニートSAFの比較

- ニートSAFの種類ごとに組成は異なる。
- ニートSAFとJet A-1では組成が異なるが、混合することによりJet A-1との差異は小さくなる。



従来燃料の組成の例



ニートSAFの組成の例

3. ニートSAFの品質規格 (ASTM D7566) Annex A1~A7

3.4.5.2 炭化水素組成の試験方法

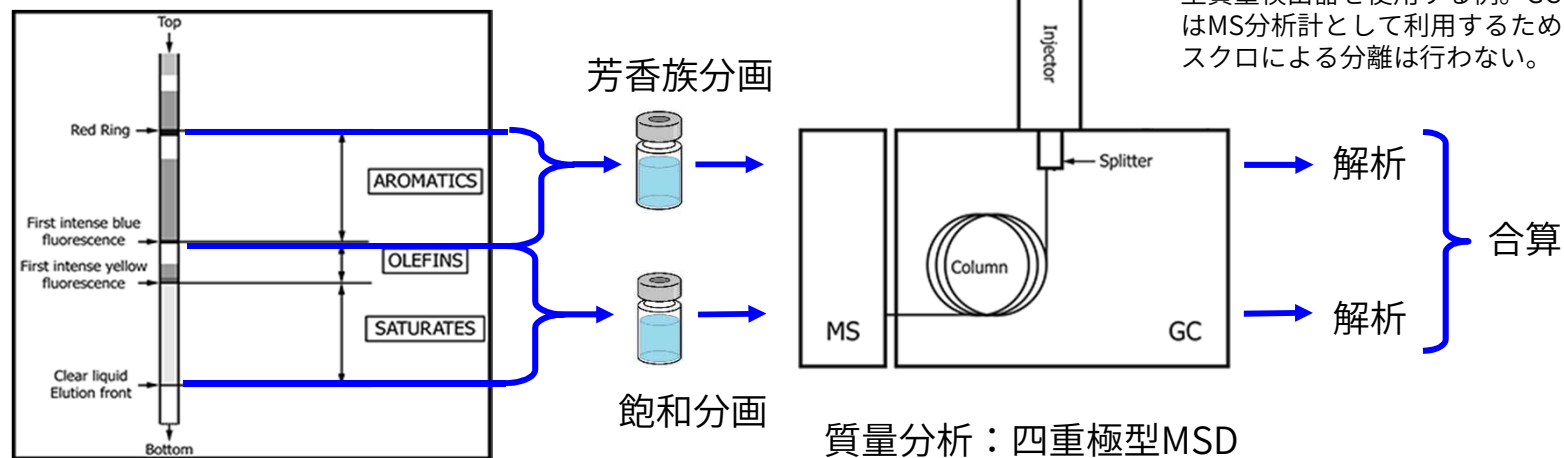
試験の概要

前処理で試料を飽和フラクションと芳香族フラクションに分離したのち、各々について質量スペクトルを測定する。質量スペクトルは、パラフィン、シクロパラフィン、芳香族の成分が混在したものになるが、計算によって各々の炭化水素グループの存在率を割出すことができる。二つのフラクションの炭化水素組成を合算し、試料全体の組成を求める。

前処理、質量分析共に複数の手法があり、任意に組み合わせて試験することが出来る。

- 前処理法： ASTM D1319 蛍光指示薬法，ASTM D2549 カラムクロマト法，ASTM D6379 HPLC法
- 質量分析： Procedure A 磁場型質量分析計，Procedure B 四重極型質量分析計

分析フローの例



前処理：蛍光指示薬法

3. ニートSAFの品質規格 (ASTM D7566) Annex A1~A7

3.4.6 炭素および水素 Carbon and Hydrogen

SAFの成分が炭化水素であることを元素分析で確認する。一般には、炭素、水素の同時測定が可能な自動分析計を使用する。

- 試験方法：ASTM D5291
- 規格値：炭素と水素の合計で 99.5質量%以上

3.4.7 窒素分 Nitrogen

非炭化水素成分の有無を確認する試験である。従来ジェット燃料には窒素分は含まれないことが分かっているため通常は測定しないが、SAFについては測定が要求される。

試験方法である化学発光法は、石油製品一般の試験方法である。

- 試験方法：ASTM D4629, IP 379 (化学発光法)
- 規格値：2 mg/kg以下

3.4.8 水分 Water

非炭化水素成分の有無を確認する試験である。

- 試験方法：D6304, IP438 (カールフィッシャー電量滴定法)
- 規格値：75 mg/kg以下

3. ニートSAFの品質規格 (ASTM D7566) Annex A1~A7

3.4.9 金属 Metals

燃料に含まれる微量金属は高温でタービン部品に腐食や堆積を引き起こす可能性がある。また微量レベルの銅は燃料を不安定性にし、酸化や不溶性堆積物の生成につながる可能性がある。微量金属の含有量を確認することは、品質確保のみならず製造プロセスの診断のためにも重要である。

- 試験方法： ASTM D7111 (ICP発光分光法)
- 測定元素 (22元素)
Al, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li*, Mg, Mn, Mo,
Na, Ni, P, Pb, Pd, Pt, Sn, Sr, Ti, V, Zn (*Liは、Annex A3, A5のみで規定)
- 規格値： 各 0.1 mg/kg (0.1 ppm)



試料を灯油で希釈してICPに直接導入し、各元素を同時測定する。

内部標準として油溶性のイットリウム、コバルト、スカンジウム等の標準物質を使用する。

ICP発光分光分析装置

3. ニートSAFの品質規格 (ASTM D7566) Annex A1~A7

3.4.10 ハロゲン Halogen

ハロゲンは通常の既存ジェット燃料には含まれないが、製造方法が異なるSAFの場合は必要である。ハロゲンの測定は、製造プロセスの監視として重要である。

試料を燃焼炉に中で酸化分解し、発生した燃焼ガスを水に吸収させる。これをイオンクロマトグラフに導入し、ハロゲンの陰イオンを定量する。

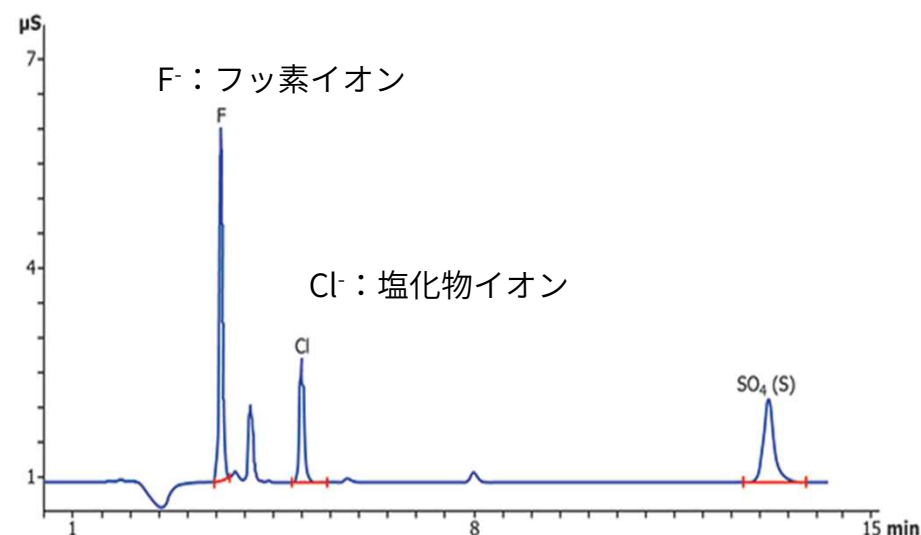
測定対象： フッ素 (F)、塩素 (Cl)

規格値： 合計で 1 mg/kg (1 ppm) 以下

試験方法： ASTM D7359 (燃焼イオンクロマトグラフィー)



燃焼イオンクロマトグラフ



クロマトグラムの例

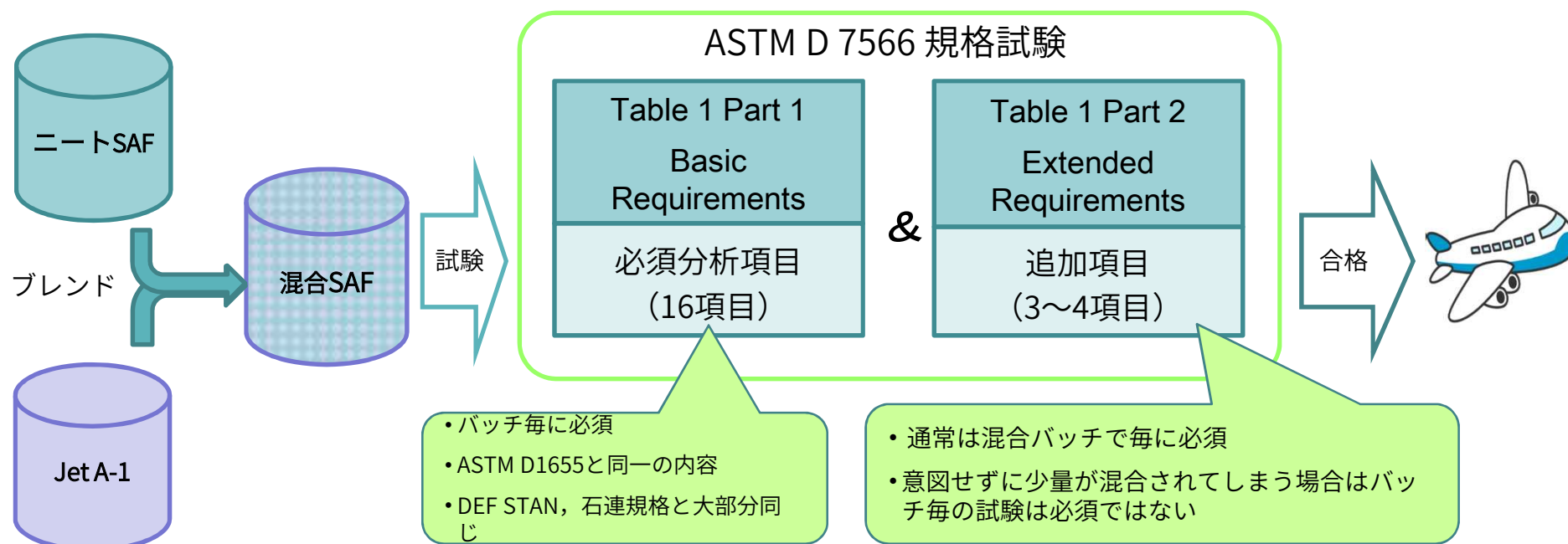
4. 混合SAFの品質規格：ASTM D7566 Table 1

4.1 ASTM D7566 Table 1の要求事項

ニートSAFはJet A-1等の従来ジェット燃料と混合してから使用される。混合後のSAFの燃料仕様は、ASTM D7566 Table1に規定されている。

Table 1は、目的の異なる2つの要求事項（Part 1， Part 2）で構成される。両方を満たすことにより、混合SAFはASTM D1655適合燃料（すなわち従来ジェット燃料）と同等と見做され、以後従来ジェット燃料と同様に扱うことができる。

- Part 1（基本要件事項）
従来燃料規格 ASTM D1655 と全く同じ要件を規定している。従来燃料としての品質確保が目的。
- Part 2（拡張要件事項）
SAFの特性が従来ジェット燃料と十分に類似していることを保証するための項目。
Part 2では合成燃料であるSAFの特性に焦点を当てた試験が設定されている。



4. 混合SAFの品質規格：ASTM D7566 Table 1

4.2 Table 1 Part 1

Table 1 Part1 Basic requirement (基本要項)

※内容は従来ジェット燃料の規格 ASTM D1655のTable 1と同一

性状	項目	ジェットAまたはジェットA-1	試験方法 (斜体はreferee method)
組成	酸価, mgKOH/g	0.1以下	D3242 / IP 354
	1. 芳香族, 容量% または	25以下	D1319, IP156, D8305
	2. 芳香族, 容量%	26.5以下	D6379 / IP 436
	メルカプタン硫黄, 質量%	0.003以下	D3227 / IP 342
	硫黄分, 質量%	0.3以下	D1266, D2622, D4294, D5453, IP 336
揮発性	蒸留性状, °C:		
	10%留出温度 (T10), °C	205以下	D86, D2887 / IP 406, D7344, D7345, IP 123
	50%留出温度 (T50), °C	報告	
	90%留出温度 (T90), °C	報告	
	終点, °C	300以下	
	残油量, %	1.5以下	
	減失量, %	1.5以下	
	引火点, °C	38以上	D56, D3828, D7236, IP 170, IP 523, IP534
密度 (15°C), kg/m ³	775~840	D1298 / IP 160, D4052, IP365	
流動性	流動性		
	析出点, °C	-40以下 (Jet A) -47以下 (Jet A-1)	D5972 / IP 435, D7153 / IP 529, D7154 / IP 528, D2386 / IP 16
	動粘度 -20°C, mm ² /s	8.0以下	D445 / IP 71 Secion1, D7042, D7945
燃焼性	真発熱量, MJ/kg	42.8以上	D4529, D3338, D4809, IP12
	(1) 煙点, mm, または	25.0以上	D1322 / IP 598
	(2) 煙点, mm, および	18.0以上	D1322 / IP 598
	ナフタレン, 容量%	3.0以下	D1840, D8305
腐食性	銅板腐食, 100°C, 2時間	1以下	D130 / IP 154
熱安定度 (260°C以上 2.5時間)	フィルター差圧, mmHg	25以下	D3241 / IP 323
	管堆積度 (VTR) または	3未満, 孔雀模様や異常色相堆積物なし	D3241 / IP 323 Annex A1
	管堆積度 (ITRまたはETR)	85以下	D3241 / IP 323 Annex A2, A3
コンタミ物	実在ガム, mg / 100 mL	7以下	D381, IP 540
	マイクロセパロメーター		D3948
	静電防止剤無添加試料	85以上	
	静電防止剤添加試料	70以上	
添加剤	電気伝導率, pS/m	600以下 (納品時50~600)	D2624 / IP 274

4. 混合SAFの品質規格：ASTM D7566 Table 1

4.2.1 ASTMD7566 Table 1 とDEF STANの違い

ASTM D7566 Table 1 Part 1は、D1655と同じ内容であるが、DEF STAN・石連規格の一部の試験項目が含まれていない。

ASTM D7566 Table 1 – Part 1 Basic requirement

性状	Jet A-1 規格値
酸価, mgKOH/g	0.1以下
1. 芳香族 (蛍光指示薬法), 容量%	25以下
2. 芳香族 (HPLC), 容量%	26.5以下
メルカプタン硫黄, 質量%	0.003以下
硫黄分, 質量%	0.3以下
蒸留性状, °C:	
10% 留出温度 (T10), °C	205以下
50% 留出温度 (T50), °C	報告
90% 留出温度 (T90), °C	報告
終点, °C	300以下
蒸留残留物, %	1.5以下
蒸留損失, %	1.5以下
引火点, °C	38以上
密度 (15°C), kg/m ³	775~840
析出点, °C	-40以下 (Jet A) -47以下 (Jet A-1)
動粘度 -20°C, mm ² /s	8.0以下
真発熱量, MJ/kg	42.8以上
(1) 煙点, mm, または	25.0以上
(2) 煙点, mm, および	18.0以上
ナフタレン, 容量%	3.0以下
銅板腐食, 100°C, 2時間	1以下
熱安定度 (260°C以上2.5時間)	
フィルター差圧, mmHg	25以下
管堆積度 (VTR) または	3未満, 孔雀模様や異常色相堆積物なし
管堆積度 (TRまたはETR)	85以下
実在ガム, mg / 100 mL	7以下
マイクロセパロメーター	
静電防止剤無添加試料	85以上
静電防止剤添加試料	70以上
電気伝導率, pS/m	600以下 (納品時50~600)

ASTM D7566 Table 1に無く
石連規格・DEF STAN 91-091 Table 1にある項目

性状	Jet A-1 規格値
外観	清澄 Clear, bright and visually free from solid matter and undissolved water at ambient fuel temperature
色 (セーボルト)	報告
微粒子よう雑物 (重量法), mg/L	1.0以下
または	
微粒子よう雑物 (粒度分布)	
≥4 μm (c)	報告
≥6 μm (c)	報告
≥14 μm (c)	報告
≥21 μm (c)	報告
≥25 μm (c)	報告
≥30 μm (c)	報告

- D7566 Table 1(part 1) には石連規格・DEF STANにあるこれらの項目が含まれない。
- 石連規格・DEF STANへの適合を確認するためには、これら項目の試験を追加で実施する必要がある。

- D7566 Table 1 Part 1は、D1655 Table 1と同じ内容

4. 混合SAFの品質規格：ASTM D7566 Table 1

4.3 Table 1 Part 2

Part 2の項目は、大部分がDEF STANや石連規格には含まれない試験である。これらは、SAF特有の性質に焦点を絞ったものであり、従来ジェット燃料では要求されない。

混合SAFの性状は、従来ジェット燃料に十分に類似したものである必要がある。前述のPart 1の試験は従来ジェット燃料を前提にしたものであり、これのみでは混合SAFの性状を十分評価することは難しい。このため、SAFについてはPart 2の試験が要求される。

ASTM D75466 Table1 Part2 – 拡張要求事項 (Extended Requirements)

性状	試験項目	規格値	試験方法 (斜体はreferee method)
組成	芳香族下限値： 以下の何れかを満たすこと		
	1. 芳香族（蛍光指示薬法），容量%	8 以上	<i>D1319</i> , IP 156, D8305
	2. 芳香族（HPLC），容量%	8.4 以上	<i>D6379</i> /IP 436
揮発性	蒸留温度傾斜		
	T50 – T10, °C	15 以上	<i>D2887</i> /IP 406, <i>D86</i> , IP 123, <i>D7344</i> , <i>D7345</i>
	T90 – T10, °C	40 以上	
潤滑性	潤滑性, mm	0.85 以下	D5001
流動性	動粘度（－40°C），mm ² /s*1	12 以下	<i>D445</i> /IP 71 Section 1W, D7945

*1 動粘度（－40°C）は、Annex A1, Annex A4の燃料を原料とした混合SAFの場合は不要

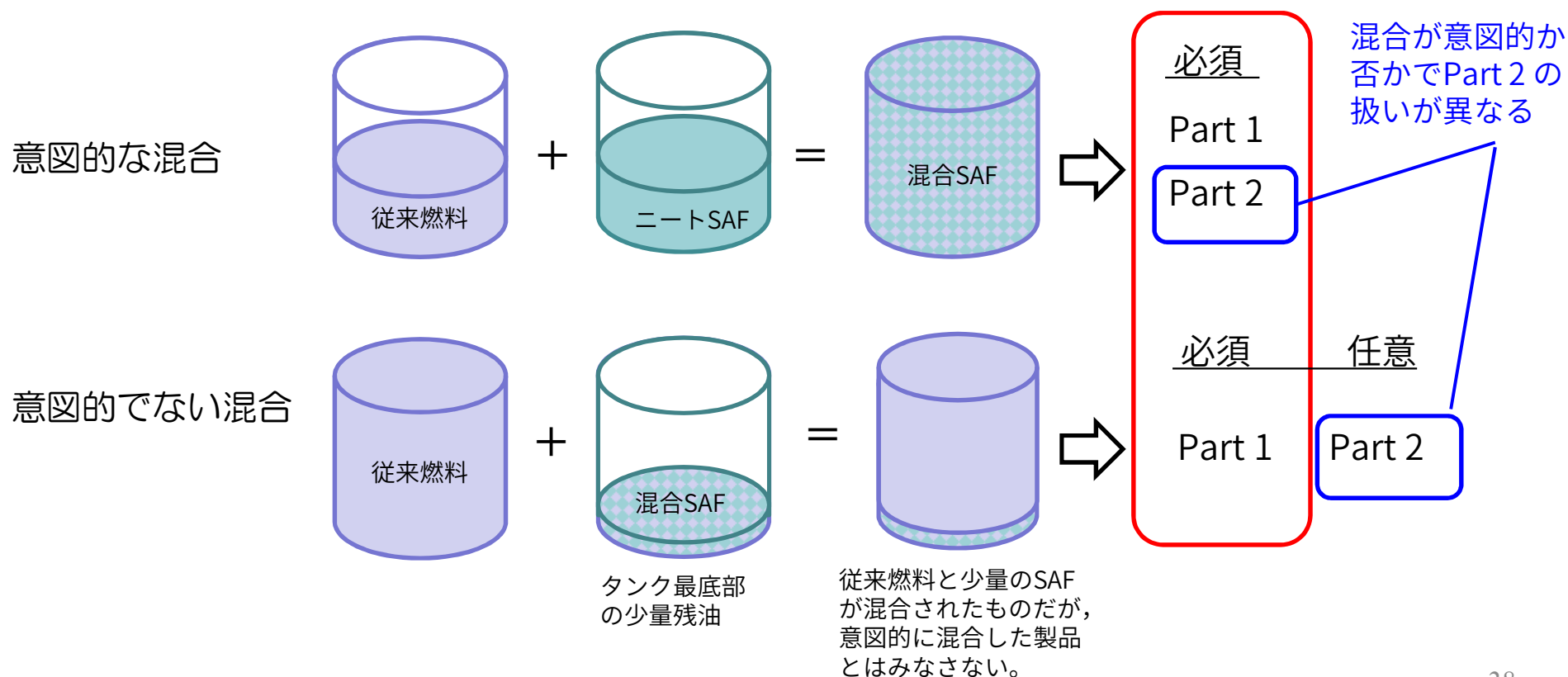
4. 混合SAFの品質規格：ASTM D7566 Table 1

4.3.1 Table 1 Part 2：Extended Requirementsの緩和条件

Part 2は従来燃料が合成燃料と意図せずに混合される場合、バッチ毎の分析は必須ではない。

例として従来燃料がタンク底部の合成燃料残油と意図せずに混合されてしまう場合が考えられる（下図の下のフロー）この場合、バッチ毎の試験は必須ではない。

Part 2 の緩和条件適用の例



4. 混合SAFの品質規格：ASTM D7566 Table 1

4.4 混合SAF特有の試験項目

Table 1 の要求項目のうち、混合SAF特有の試験あるいは混合にあたって注意を要するものについて解説する。

Part 1 Detailed Requirements (詳細要求事項)

- 密度
Part 1は従来燃料規格 ASTM D1655と同様であるため、SAF特有の項目は存在しないが、密度についてはブレンド時にSAF特有の注意事項がある。

Part 2 Extended Requirements (拡張要求事項)

- 芳香族 (下限値)
- 蒸留傾斜 (T90-T10)
- 蒸留傾斜 (T50-T10)
- 潤滑性 (BOCLE)
- 動粘度 (-40°C)

4. 混合SAFの品質規格：ASTM D7566 Table 1

4.4.1 密度 Density

ジェット燃料の密度には上限と下限が設定されている。密度が低すぎると燃料のエネルギー密度が低くなり、限られたタンク容量では十分なエネルギーが得られない。

Annex A1やA2のニートSAFは芳香族を含まないため、一般に従来ジェット燃料より密度が低い。このため、単独ではジェット燃料としての密度の下限値を満たさない。これらのニートSAFをJet A-1と混合する際は、混合SAFの密度が規格下限を下回らないよう注意する必要がある。場合によっては上限である50%まで混合できない場合がある。

例1

ニートSAF密度が 740 kg/m^3 の場合、SAF50%混合で規格値 (775.0 kg/m^3) を満たすためには、Jet A-1の密度は何 kg/m^3 以上でなければならないか？

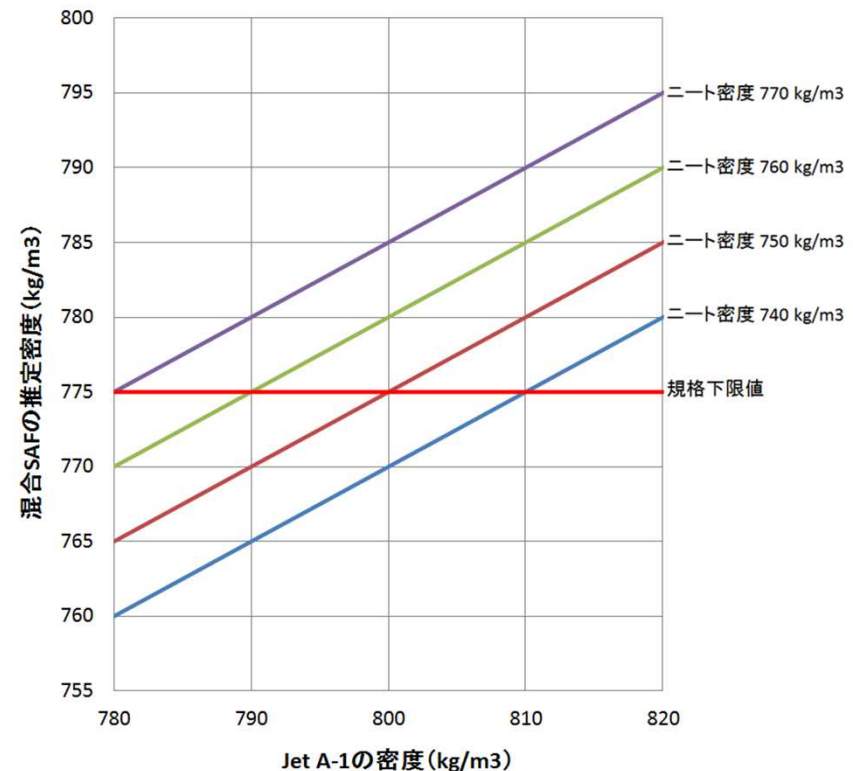
回答： 800 kg/m^3 以上必要

例2

ニートSAF密度が 740 kg/m^3 ，Jet A-1 密度が 790 kg/m^3 の場合、SAF50%混合で規格値 (775.0 kg/m^3) を満たすためには、ニートSAFは何%まで混合できるか？

回答： 37.5 容量%まで

基材密度と混合後の推定密度



密度は線形ブレンド(加重平均)で予想可能である。

4. 混合SAFの品質規格：ASTM D7566 Table 1

4.4.2 芳香族（下限値） Aromatics

芳香族炭化水素は燃焼性が良くないため、通常は品質規格で上限を定めている。

しかし、芳香族が少なすぎると老化したエラストマーシール材が収縮し燃料漏れの恐れがある。多くの種類のニートSAFは芳香族をほとんど含まないため、混合SAFの芳香族が規定の下限値を下回ることがないように確認する。

- 試験方法
Part 1 の芳香族試験の結果を下限値と照合する。新たな試験は不要である。
- 規格値
規格値は試験方法によって異なる。
 - 8 容量%以上 蛍光指示薬法 (D1319)
 - 8.4 容量%以上 HPLC法 (D6379)
- 参考
Jet A-1の芳香族含有率は通常は16～22 容量%，少ない場合でも8 容量%である。芳香族含有率には加成性が成り立つため、混合SAFの芳香族（容量%）は計算である程度予測することができる。例えば、JetA-1に芳香族が16 容量%以上含まれれば、芳香族0%のニートSAFを50%混合しても、混合SAFの芳香族は8 容量%以上と予想される。品質確定のためには、予想値ではなく実際の測定結果が必要である。

芳香族 規格値	試験方法	
	ASTM D1319	ASTM D6379
上限 (Part 1)	25 容量%	26.5 容量%
下限 (Part 2)	8 容量%	8.4 容量%

4. 混合SAFの品質規格：ASTM D7566 Table 1

4.4.3 蒸留傾斜（T90-T10， T50-T10）

Part 1 の蒸留試験に加えて，Part 2 では蒸留温度傾斜を報告する。報告する項目は，ニートSAFでも要求されている，T90-T10（90%留出温度と10%留出温度の差）およびT50-T10（50%留出温度と10%留出温度の差）である。

従来ジェット燃料は幅広い蒸留範囲を持ち，これによりエンジン内での燃料時の良好な混合と霧化が保障されている。一方，一部のニートSAFでは蒸留範囲がより狭い場合があるが，混合SAFの段階では従来ジェット燃料と同様の幅広い蒸留範囲を有することが重要である。

蒸留性状は線形ブレンド（加重平均が成り立つブレンド）ではないため，ニートSAFとJet A-1の蒸留性状から蒸留温度傾斜を完全に推定することは出来ない。

蒸留傾斜の規格値（ニートSAFと同様の設定）

項目	規格値	Jet A-1通常値
T50-T10 ※Annex A6のみで必要	15°C以上	12~30°C
T90-T10	40°C以上	35~75°C

4. 混合SAFの品質規格：ASTM D7566 Table 1

4.4.4 潤滑性試験（BOCLE）

ジェット燃料は、それ自体が飛行機の燃料システムを潤滑するため、良好な潤滑性が要求される。石油系ジェット燃料の場合、原油由来の微量な極性物質が潤滑性を担っており特別な場合を除き潤滑性を確認する必要はなかった。^{*1}

しかし、合成燃料であるニートSAFには極性の潤滑物質は含まれていないため、混合SAFの段階で潤滑性を確認することになっている。

現代の航空機は低潤滑性の燃料でも使用できるが、一部の古い機種はそうではないため、試験が要求される。

試験にはBOCLE（Ball on Cylinder Lubricity Evaluator）という試験器を使用する。

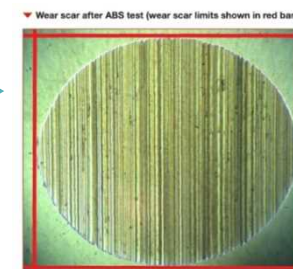
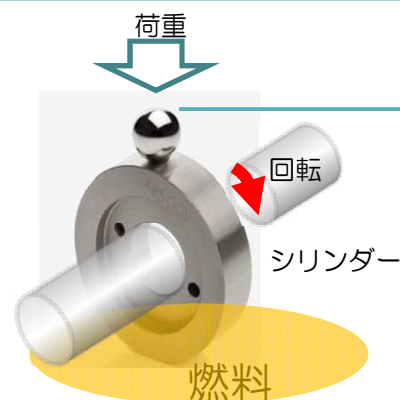


試験器(BOCLE)
試験方法：ASTM D5001

潤滑性試験の仕組み

金属のボールとシリンダーの間にサンプルの油膜を作り、シリンダーを回転させて、一定時間運転することによりボール上に摩耗痕を付ける。

その後、摩耗痕径を顕微鏡で計測する。痕径が小さいほど、潤滑性が良いと判断される。



ボールの摩耗痕径を計測
縦横の平均値(μm)を報告

^{*1} 従来型燃料についても必要な場合は潤滑性を試験する必要がある。DEF STAN・石連規格では、高度に水素化処理基材が20%を超え、非水素化燃料が5%未満の場合は、潤滑性試験が要求されているが、国内製造のJet A-1はこれに該当しない。なお、DEF STAN・石連規格では合成燃料を含む場合は潤滑性試験が必要である（SAFはこれに該当する）。潤滑性試験の要求事項は、旧式の燃料ポンプを想定している。

4. 混合SAFの品質規格：ASTM D7566 Table 1

4.4.5 動粘度（ -40°C ） Viscosity minus 40°C

一部の航空機では、燃料の動粘度上限は $12\text{ mm}^2/\text{s}$ とされている。しかし、析出点近く※1の低温に冷却された場合、燃料によっては動粘度が $12\text{ mm}^2/\text{s}$ を超える可能性がある。

現代の航空機には燃料を加熱して粘度を下げる機能があり、低温で燃料が流動性を保つことが出来るが、一部の航空機にはその機能が無い。

従来燃料の場合、低温での動粘度特性は分かっているため、動粘度は -20°C で品質保証すれば -40°C における動粘度も把握することができる。しかし、SAFの場合は従来同様には動粘度の挙動を予測できないため、 -40°C で実際に測定する必要がある。

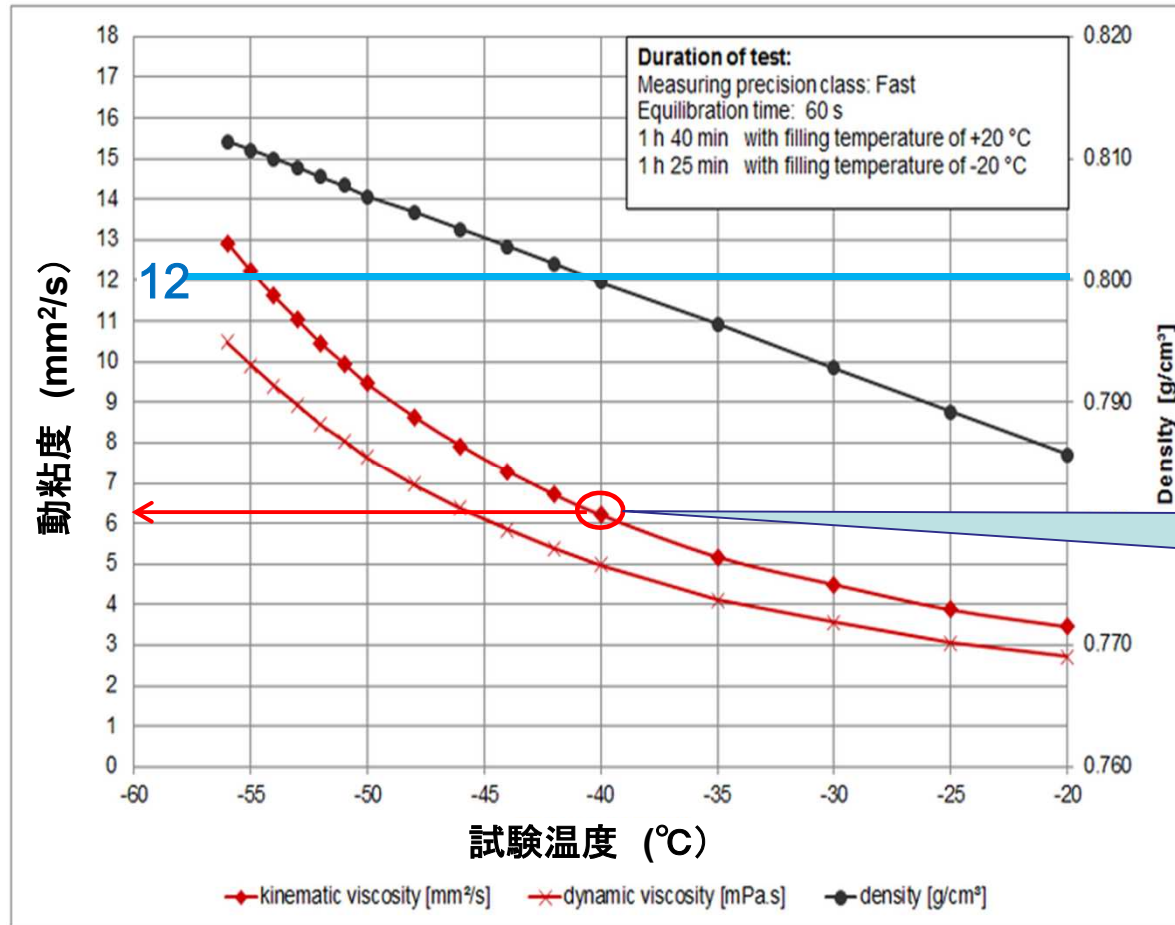
SAFによっては、許容上限まで混合すると混合SAFの動粘度（ -40°C ）が規格値を超えることも有り得る。その場合は混合率を下げる必要がある。混合による動粘度の変化は非線形（加重平均が成り立たない）である点に注意する必要がある。

- 規格値： $12\text{ mm}^2/\text{s}$ 以下
- 試験方法：ASTM D445 /IP 71 Section 1W, D7945

※Jet A-1の析出点規格値は -47.0°C 以下である。製品の通常の析出点は -50°C を下回っている。

4. 混合SAFの品質規格：ASTM D7566 Table 1

4.4.5.1 動粘度の温度依存性



- Jet A-1 の -40°C 動粘度は通常 $12\text{mm}^2/\text{s}$ より十分に低く、粘度と温度の関係も分かっているため、動粘度は -20°C で管理すれば十分である。
- 混合後SAFの場合は知見が十分でないため、 -40°C で試験して確認する必要がある。

Jet A-1の動粘度
 -40°C で $6\text{mm}^2/\text{s}$ 程度

参考図： Jet A-1の動粘度と密度の温度による変化

出典：[Viscosity of Aviation fuel and jet fuel – viscosity table and viscosity chart](http://www.anton-paar.com/wiki/viscosity-of-aviation-fuel-and-jet-fuel-viscosity-table-and-viscosity-chart) :: Anton Paar Wiki (anton-paar.com)

5. 関連規格等

SAF（合成燃料）に関する規定

	規格番号/名称	発行元	発行年
EI 1533	半合成ジェット燃料および合成混合成分 (SBC) の品質保証要件 EI/JIG 規格 1530 の補足文書	Energy Institute	2022.11 (初版)
ASTM D7566	合成炭化水素を含む航空タービン燃料の標準仕様	ASTM international	2022.11
ASTM D4054	新しい航空タービン燃料および燃料添加剤の評価のための標準的な プラクティス	ASTM international	2022.7
	持続可能な代替航空燃料（SAF）取扱い要領	石油連盟	2021.9 (初版)

航空燃料全般に関する規定

	規格番号/名称	発行元	発行年
Defence Standard 91-091	Jet A-1の英国国防省による品質規格	英国国防省	2022.3 第14版
ASTM D1655	ジェット燃料のASTM品質規格	ASTM international	2022.11
JIG Bulletin No. 144	AFQRJOSジョイントチェックリスト 第33版	JIG	2022.4 (第33版)
	共同利用貯油施設向け統一規格	石油連盟	2022.11 (第33版)
	ジェット燃料取扱基準に関する指針（石連指針）	石油連盟	2021.1 (初版)