



米国におけるエタノール燃料採用の歴史： 政策、経済、ロジスティックス

ケリー・ジョンソン¹、クリスティ・モリアーティ¹、
テレサ・アレマン¹、ダニロ・サンティニ²

1 国立再生可能エネルギー研究所

2 アルゴンヌ国立研究所

NREL は、持続可能なエネルギーのための同盟社が運営する、米国エネルギー省エネルギー効率・再生可能エネルギー局の国立研究所である。

本レポートは、国立再生可能エネルギー研究所（NREL）のウェブサイト www.nrel.gov/publications から無料で入手可能である。

契約番号：DE-AC36-08GO28308

テクニカル・レポート
NREL/TP-5400-76260
2021年11月



米国におけるエタノール燃料採用の歴史： 政策、経済、ロジスティックス

ケリー・ジョンソン¹、クリスティ・モリアーティー¹、
テレサ・アレマン¹、ダニロ・サンティニ²

1 国立再生可能エネルギー研究所

2 アルゴンヌ国立研究所

推奨する引用表記

ケリー・ジョンソン、クリスティ・モリアーティー、テレサ・アレマン、ダニロ・サンティニ。2021。米国におけるエタノール燃料採用の歴史：政策、経済、ロジスティックス（History of Ethanol Fuel Adoption in the United States: Policy, Economics, and Logistics）。コロラド州ゴールデン：国立再生可能エネルギー研究所。NREL/TP-5400-76260。

<https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/76260.pdf>

NREL は、持続可能なエネルギーのための同盟社が運営する、米国エネルギー省エネルギー効率・再生可能エネルギー局の国立研究所である。

本レポートは、国立再生可能エネルギー研究所（NREL）のウェブサイト www.nrel.gov/publications から無料で入手可能である。

契約番号：DE-AC36-08GO28308

テクニカル・レポート
NREL/TP-5400-76260
2021年11月

国立再生可能エネルギー研究所
15013 デンバー・ウェスト・パークウェイ
ゴールデン、コロラド、80401
303-275-3000 www.nrel.gov

告知

本文書の一部は、持続可能なエネルギーのための同盟社が運営する国立再生可能エネルギー研究所により、契約番号 DE-AC36-08GO28308 に基づいて米国エネルギー省（DOE）のために書かれた。資金は、米国エネルギー省エネルギー効率・再生可能エネルギー局自動車技術室によって供与された。本書で表明されている見解は必ずしも DOE または米国政府の見解を表すものではない。

本レポートは、国立再生可能エネルギー研究所（NREL）のウェブサイト www.nrel.gov/publications から無料で入手可能である。

1991 年以降に作成された米国エネルギー省（DOE）のレポート、および増え続ける 1991 年以前の文書は www.OSTI.gov から無料で入手可能である。

表紙写真提供：デニス・シュローダー：（左から右に時計回り）NREL 51934、NREL 45897、NREL 42160、NREL 45891、NREL 48097、NREL 46526

NREL は再生物含有紙に印刷を行っている。

謝辞

本プロジェクトへの資金供与、主要なデータと洞察につながった燃料供給業者と職員の紹介に対し、米国エネルギー省自動車技術室、技術統合プログラムに感謝申し上げます。また、情報提供に対し、我々の同僚であるジーナ・フィオローニとキャメロン・ヘイズに感謝申し上げます。最後に、K ムーア・コンサルティングのクリスティー・ムーア氏からいただいた業界洞察は大変貴重なものであった。

頭字語リスト

AKI	アンチノック・インデックス (anti-knock index)
CAA	大気浄化法 (Clean Air Act)
CAFE	企業平均燃費 (Corporate Average Fuel Economy)
DOE	米国エネルギー省 (U.S. Department of Energy)
E0	純ガソリン (0%エタノール)
E10	10%エタノール燃料
E15	10.5%~15%エタノール燃料
E85	51%~83%エタノール燃料
EPA	米国環境保護庁 (U.S. Environmental Protection Agency)
FFV	フレックス燃料車 (flexible-fuel vehicle)
GGE	ガソリン・ガロン等価物 (gasoline gallon equivalent)
GHG	温室効果ガス (greenhouse gas)
LDV	軽量自動車 (light-duty vehicle)
MTBE	メチル tert-ブチル・エーテル (methyl tert-butyl ether)
NHTSA	米国運輸省道路交通安全局 (National Highway Transportation Safety Administration)
NOx	窒素酸化物 (nitrogen oxides)
OEM	相手先商標製品製造会社 (original equipment manufacturer)
OPEC	石油輸出国機構 (Organization of the Petroleum Exporting Countries)
RFS	再生可能燃料基準 (Renewable Fuel Standard)
RVP	リード蒸気圧 (Reid vapor pressure)
TEL	四エチル鉛 (tetra-ethyl lead)
UL	UL LLC (旧称：アンダーライターズ・ラボラトリーズ)

エグゼクティブ・サマリー

エタノールは、米国で研究、開発、および展開されてきたすべての代替輸送燃料の中で最大の市場シェアを達成した。将来の燃料と製品に適用可能な、エタノール採用の歴史から学ぶことのできる教訓は多い。

エタノールは3つの主要な混合レベルでガソリンの一部を置き換え、それぞれに対応する車両、装置、利益、および政策がある。最初の混合レベルはE10（10%エタノール燃料）であり、今では米国内で販売されるほとんどすべての純ガソリン（E0）を置き換えた（U.S. Energy Information Administration 2016）。これは、エンジン性能、エネルギー安全保障、健康、大気質、および気候保護に関連する多くの要素から動機付けられた、数世代にわたる政策によってもたらされた。エタノールは、オクタン価の高さが一貫してその推進力となってきた。なぜなら、オクタン価が高いことによりエンジンの高性能化を可能にするからである。初期の政策（1973～1979年）は主に、石油輸出国機構（OPEC）加盟国から供給される石油への依存度を減らしたいという願望が動機となっていた。1980年代の燃料政策は主に、鉛に取って代わる可能性のあるオクタン価向上剤の推進を追求するものであった。基準汚染物質の低減は、1990年から2005年に講じられた措置の包括的な目標であった。2005年から現在までの燃料政策は主に、エネルギー安全保障と気候保護という目標によって動機付けられている。これらの政策は通常、特定の技術に依存せず各期間で多くの燃料と添加物を推進するものであった。しかし、エタノールは、これら4つの期間すべての政策環境で成功をもたらしたその品質により、費用対効果が高いことが特定された唯一の燃料である。

エタノールの第2の市場はE85を介するものである。E85は、51%～83%のエタノールを含有する燃料を指すマーケティング用語である。この燃料にはエタノール濃度が高いという利点があるが、レギュラー・ガソリン車に適合しないという欠点があり、フレックス燃料車（FFV）でしか使用できない。FFVは、E0からE85までのあらゆる混合レベルを使用可能である。したがって、E85の消費量を増やそうとする取り組みの多くは、自動車メーカーにFFVの製造を、ドライバーにFFVの購入を、給油所にE85の販売設備を整えることを奨励することを目指すものであった。

エタノール消費の3番目となる最も新しい市場は15%エタノール（E15）である。E15市場は、一般的なガソリン車によるエタノール消費を増やすために、E10市場を基礎として構築されている。E15市場構築の取り組みは主に、車両と給油設備の適合性試験、E15を使用可能にするための適用除外の付与、E15販売店への要求、および販売店へのE15購入設備導入の奨励からなっていた。

目次

エグゼクティブ・サマリー	iv
1. はじめに.....	1
2. E10.....	1
2.1. 1973～1980年：エネルギー安全保障がエタノール使用の動機付けに	1
2.2. 1980～1990年：脱鉛によりオクタン価向上剤の使用が必要に	2
2.2.1. オクタン価向上剤としての芳香族化合物	3
2.2.2. オクタン価向上剤としてのメタノールと MTBE	4
2.2.3. オクタン価向上剤としてのエタノールの使用.....	5
2.3. 1990～2005年：大気質が含酸素添加剤使用の動機付けに	6
2.4. 2005～2016年：エネルギー安全保障と気候保護がエタノール使用の動機付けに	8
3. E85 およびフレックス燃料車.....	9
3.1. E85 規則.....	9
3.2. フレックス燃料車	9
3.3. インフラ	11
3.4. インセンティブ	12
4. E15.....	13
4.1. E15 を許可するための規則	13
4.2. E15 規則.....	13
4.3. E15 インセンティブ	14
4.4. 結論	14
5. 参考文献.....	14

図リスト

図 1	米国の年別含酸素添加剤消費量、1978～2014 年.....	5
図 2	RFS2 で制定された年別バイオ燃料量	8
図 3	米国内の年別 E85 給油所数.....	11
図 4	FFV の黄色燃料タンク・キャップとそれに合う給油機のノズル.....	12

表リスト

表 1	オクタン価向上剤、燃料、およびその 1991 年湾岸価格.....	3
-----	-----------------------------------	---

1. はじめに

エタノールは、米国で研究、開発、および展開されてきたすべての代替輸送燃料の中で最大の市場シェアを達成した。将来の燃料と製品に適用可能な、エタノール採用の歴史から学ぶことのできる教訓は多い。本レポートは、エタノールが今日の市場シェアを達成するために要したおよそ 50 年間について記述したものである。

今日、消費されるエタノールの多くは 3 つの燃料市場で利用されている。最も大きなものは E10（10%エタノール燃料）市場である。エタノールをガソリンに加える動機付けと戦略は時とともに変化した。E10 が純ガソリン（E0）をほぼ完全に置き換えることになった。E10 市場開発の多くと重なったのが、ガソリン、E85、またはその中間のあらゆる混合物を使用できるフレックス燃料車による、E85（85%エタノール燃料）市場を創出する動きであった。最後に、エタノールでガソリンを置き換える比較的最近の取り組みにおいて、混合レベルを E10 から E15（10.5%～15%エタノール燃料）に上げるための進歩があった。

2. E10

ほとんどすべてのガソリンに 10%レベルのエタノールを混合することが、これまで突出して大きなエタノール市場であり、現在、米国内で販売されているほとんどすべてのガソリンが 10%のエタノール（E10 と呼ばれる）を含有している（U.S. Energy Information Administration 2016）。これは、エネルギー安全保障、健康、大気質、および気候保護に関連する多くの要素から動機付けられた、数世代にわたる政策によってもたらされた。さらに、エタノールはオクタン価が高いことにより圧縮比、したがってトルクを増大させるため、エンジンの高性能化を可能にする。オクタン価向上剤の初期の需要は、ガソリンから四エチル鉛（TEL）を除去するために生じた。初期の政策（1973～1979 年）は主に、石油輸出国機構（OPEC）加盟国から供給される石油への依存度を減らしたいという願望が動機となっていた。1980 年代の燃料政策は主に、鉛に取って代わる可能性のあるオクタン価向上剤の推進を追求するものであった。基準汚染物質の低減は、1990 年から 2005 年に講じられた措置の包括的な目標であった。2005 年から現在までの燃料政策は主に、エネルギー安全保障と気候保護という目標によって動機付けられている。これらの政策は通常、特定の技術に依存せず各期間で多くの燃料と添加物を推進するものであった。しかし、エタノールは、これら 4 つの期間すべての政策環境で成功をもたらしたその品質により、費用対効果が高いことが特定された唯一の燃料である。

2.1. 1973～1980 年：エネルギー安全保障がエタノール使用の動機付けに

1970 年代、米国では国内原油生産量が減少し始め、価格が上昇し、輸入が急増した。トウモロコシ加工業者とトウモロコシ農家は、国産ガソリンの供給量を拡大し、低いトウモロコシ価格を上昇させるガソリン添加物としてエタノールを市場に出す機会を認識した。ネブラスカ州もまた、GM が 1970 年に無鉛ガソリンの将来に備えるための計画を発表したのと同じ早い時期にオクタン価向上剤の潜在性を認識していた可能性があり、「農産物産業利用委員会」を 1971 年に設置した（Round 1973）。

OPEC による 1973～1974 年の原油禁輸措置がこの新たなエタノール／農業の政治的影響力を刺激し、外国産油への米国の依存度を低減するための手段としてのエタノールの使用拡大を推し進めた。1975 年、国内燃料生産を推進する州／地域イニシアティブのもう 1 つの例において、ネブラスカ州は 30 数台の車両で 10%エタノール混合物のフィールド試験を開始した（Bechtold 1987）。ほどなく、主に税関連の金銭的インセンティブが 1978～1981 年の期間に中西部諸州と

連邦レベルで出現した。石油価格が急騰し、国内石油生産量が減少した 1975～1981 年頃、全米トウモロコシ生産者協会（トウモロコシ売上高からの天引きによって間接的に資金が供給される）、全米ガソール・ロビー、およびその後は新たに設立された再生可能燃料協会が、エタノールに有利な州法、連邦法、およびインセンティブを求める圧力をかけた。法律、インセンティブ、規制の変更、および科学的、工学的メリット分析という険しい道を経て、エタノールは市場の中で「膠着状態」にあった。

議会は、1978 年に E10（ガソリン部分を含む）を自動車燃料に対する連邦物品税の課税対象から外すことにより、エタノール市場を押し上げた（Energy Tax Act 1978）。25 州がこれに倣い、州のガソリン物品税のすべてまたは一部から E10 を除外した。相手先商標製品製造会社（OEM）は、エンジンにペーパー・ロックを生じるガソリン／エタノール混合物の揮発性上昇に懸念を示したが、E10 は大気浄化法（CAA）211(f)の燃料認可に基づいてガソリンに「実質的に類似」していると米国環境保護庁（EPA）が 1979 年に決定したため、E10 は燃料として法的に認められた（Federal Register 1979）。

燃料販売店、およびその給油機に対する管轄権を有する当局は、E10（歴史的にガソールと呼ばれていた）が給油機に及ぼす可能性のある影響を懸念していたため、アンダーライターズ・ラボラトリーズ（UL）は、当初 1930 年に書かれたエタノール混合規格 UL 87 を 1978 年に改訂した。追加試験なしで最大 10%のエタノール混合物の導入を許容するこの規格は、2015 年に最初の改訂が行われ（UL 87a）、10%を超える混合物に対応するようになった（Brooke Higginbotham、著者への 2016 年 1 月 5 日付け E メール・メッセージ）。その場合、より高いパーセンテージ・レベルの混合物には追加試験が要求された。

1979～1981 年に起きた石油価格の高騰が、エタノールに有利な法制の新たなうねりを引き起こした。石油会社は当初、1979 年の第 2 次石油価格ショックの後、エタノールを混合する新たな取り組みに抵抗したため、議会は 1980 年にガソール競争法を制定してこれに応えた。この法律は、石油会社から差別された場合にエタノール会社が受けることができる補償を 3 倍にするものであった（Morris 1992）。議会は物品税の免除措置をすべての低エタノール混合物に拡大し（のちの含酸素添加剤要件にとって重要）、混合業者がそれを所得税控除と見なせるようにして措置をさらに柔軟なものにした（Crude Oil Windfall Profits Tax 1980）。さらに、1980 年のエネルギー安全保障法は、さまざまなメカニズムを通してエタノール生産施設の建設に 10 億ドルを超える資金を提供した。同時に、アーチャー・ダニエルズ・ミッドランド社は、エタノールを（化学物質ではなく）燃料として、鉄道、平底荷船、およびトラックによる輸送料金を下げるように交渉した。1980 年代を通して行われたこれらの政策と交渉の結果、相当な量のエタノールが、主にコーン・ベルトでガソリンにスプラッシュブレンドされた。しかし、E10 は経済性に問題を抱えていた。含酸素添加剤用混合基材は当時生産されていなかったため、最終燃料のオクタン価は車両が利用できるオクタン価より高く、したがってオクタン価を上げたことによる恩恵は無駄になった。

2.2. 1980～1990 年：脱鉛によりオクタン価向上剤の使用が必要に

エタノール市場は、ガソリンから TEL が除去されたときに開かれた。TEL やその他のオクタン価向上剤がないとエンジン性能（トルクおよび出力）は低下する。TEL は 2 つの理由によりガソリンから除去された。1 つ目は、重要なオゾン先駆物質である一酸化炭素（CO）、炭化水素、および窒素酸化物（NOx）の排気管からの排出量を大幅に低減する可能性のある技術である、触媒コンバーターを使用できるようにするためであった。TEL を除去しないと、触媒が損傷し

たり「毒で汚染」されたりして触媒コンバーターが効果を失う。TEL を低減する 2 つ目の理由は、排気管からの TEL 排出が主に子どもの学習障害と行動上の問題を引き起こす問題であるという科学的確実性が着実に大きくなっていったことであった (Splitter、Pawlowski、および Wagner 2016)。

2.2.1. オクタン価向上剤としての芳香族化合物

TEL が 1980 年代を通してガソリンから段階的に除去されるにつれ、精製所は主にガソリンの芳香族化合物成分を 1979 年の 22 体積パーセントから 1990 年には 33 体積パーセントに増やして、失われたオクタン価を埋め合わせた (Morris 1992)。芳香族化合物はオクタン価を向上させるための最も安価な選択肢であったため、精製業者は当初、芳香族化合物を選択した (表 1)。揮発性は、ガソリンがどの程度容易に蒸発するかを表す計測基準であるリード蒸気圧 (RVP) で測定する。蒸発したガソリンは地表面でのオゾン形成に寄与するため、EPA は 1989 年 (芳香族化合物の使用量が大幅に増加した期間の終わり近く) に RVP の規制を開始した。こういった制限は夏季のガソリンに適用され (オゾン形成は温度に左右されるため)、州ごとに異なるが、一般的な制限は RVP が 9 ポンド/平方インチ (psi) を超えてはならないとするものである。

表 1 オクタン価向上剤¹、燃料、およびその 1991 年湾岸価格

オクタン価市場		
化学物質	実際の AKI	価格 (ドル/ガロン)
メタノール	115	\$0.37
n-ブタン	91	\$0.37
イソブタン	121	\$0.41
エタノール (連邦 E10 優遇税制あり)	110	\$0.61
トルエン	103	\$0.75
キシレン	106	\$0.75
メチル tert-ブチル・エーテル (MTBE)	110	\$0.98
ベンゼン	101	\$1.13
エタノール (優遇税制なし)	110	\$1.15
燃料市場 (ガソリン・ガロン等価物 [GGE] 当たり価格)		
燃料	オクタン価 (R+M)/2	価格 (ドル/GGE)
ガソリン	87	\$0.52
エタノール (連邦 E10 優遇税制あり)	110	\$0.93
エタノール (優遇税制なし)	110	\$1.75

出典：オクタン・ウィーク、1992 年 1 月 6 日、米国エネルギー情報局 (1992)

¹ 実際のアンチノック・インデックス (AKI) と混合 AKI は基材の炭化水素組成によって変わり、極めて非線形性であることがある。非線形オクタン混合に関する優れた議論が Ghosh、Hickey、および Jaffe (2006) に示されている。

2.2.2. オクタン価向上剤としてのメタノールと MTBE

段階的な脱鉛によって失われたオクタン価を精製所が埋め合わせるための 2 番目に一般的な選択肢は、メタノールを添加することであった。1980 年代のメタノールの唱道者と研究者には、中東の供給管理が新たに勢力を得た OPEC 加盟国によって奪われる中で、企業の存続を求めている主要な「天然ガスに富む」化石燃料生産者が含まれていた。

メタノール、またはメタノールを主成分とする液体燃料を燃料とする車両を導入するための技術的、法的な段取りをつける非常に重要な取り組みがあった。重要な法制は、米国の 19 都市にメタノールを導入するという、ジョージ・H・W・ブッシュ大統領による 1990 年の議会への提案であった。この取り組みは、メチル tert-ブチル・エーテル (MTBE) と混合されて保有車両全体に販売されたガソリンが、排気管からの排出量が少なく、メタノール給油施設の数が少ないメタノールを燃料とする車両のゆっくりした市場浸透と同様に排出量を低減できることが示されたときに終わった (National Research Council 1991、Bechtold、Goodman、および Timbario 2007)。

メタノールは、競合する代替燃料に照らしたさらなる評価に委ねられ、1986 年までに市場から完全に消えた (Peeples 1991)。メタノールは MTBE 生産材料の 1 つであるため、1980 年代にメタノールを支持していた既存のメタノール生産者は今や MTBE ベースの改質ガソリンを推進した。天然ガスはメタノールの主原料である。したがって、天然ガスに富む化石燃料エネルギー会社は、既存のエンジンに使用する液体燃料のベースとしての天然ガスの使用という目標を間接的に達成することになった。

この時点で、MTBE が一般に好まれるオクタン価向上剤となった。石油会社はエタノールより MTBE を好んだ。これは主に、MTBE が精製所の副産物とメタノールの組み合わせから生産され、精製所複合施設内で加工され、パイプラインに入り、したがって精製業者の管理下に置くことができるためである。その上、MTBE は既存のインフラを使用していた。MTBE の使用量は、プレミアム・ガソリンに重点を置くことの一環として 1985~1999 年の間、特に夏季に急速に増加した (図 1 参照) (Colucci 2013)。

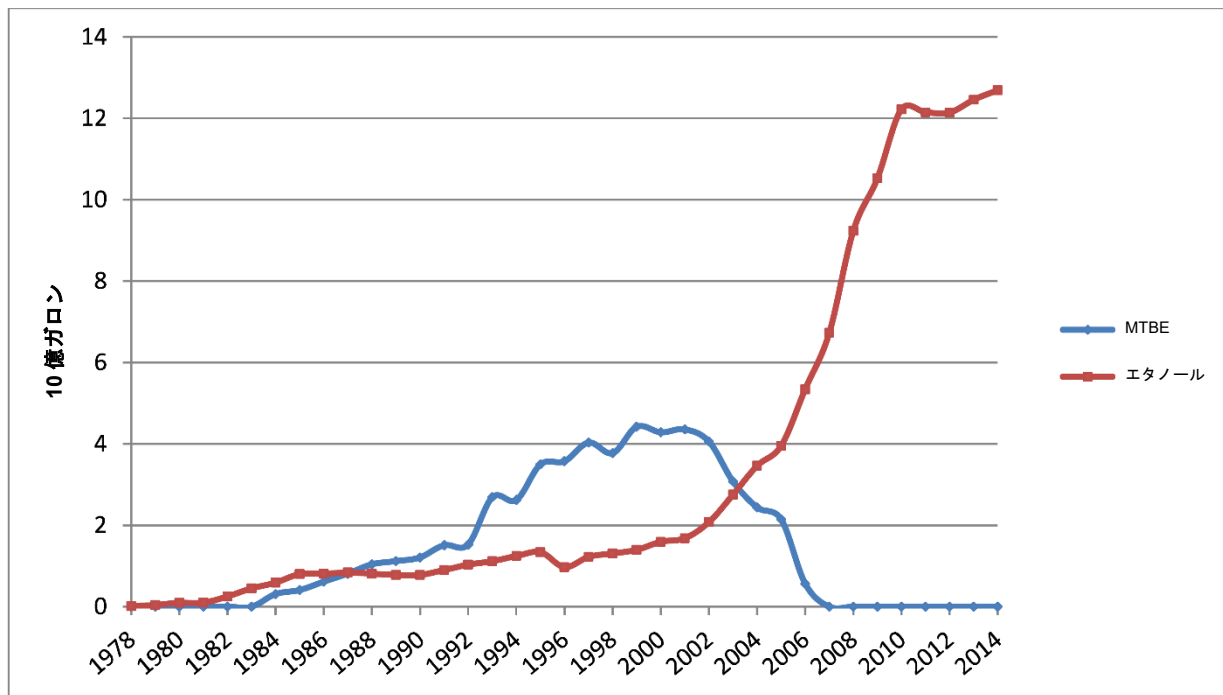


図1 米国の年別含酸素添加剤消費量、1978～2014年

出典：1978～1991年データ：Morris (1992)、1992～2014年データ：EIA 年間エネルギー展望

2.2.3. オクタン価向上剤としてのエタノールの使用

エタノールは、TELの除去によって失われたオクタン価を埋め合わせるための第3の方法であった。1985年6月、大手石油企業の中でアモコ社だけが、中西部7州でオクタン価向上剤として特にエタノールとともに使用するための低オクタン有鉛ガソリン混合基材を生産した (Bechtold 1987)。当然ながら石油大手の影響力は大きく、ウィリアムズ社のパイプラインが中西部の8カ所のターミナルでサブオクタン (85オクタン) 有鉛ガソリン・グレードを1985年7月に追加し、次いで同年10月に「通常製品」として出荷することにつながった。最終的に、この使用がエタノールの高オクタン特性を利用し、そのニッチ市場が燃料からオクタン価向上剤に移った。この市場シフトはエタノールに有利であった。なぜなら、そのためにエタノールは一般にガソリンより高価で普及度が低い添加剤と競合するようになったからである (表1参照)。この時点で、エタノールの高いオクタン価が精製業者により実現され、精製業者は含酸素添加用基材を87 AKIから84 AKIに落とすことによってコストを削減できた (SmithおよびMorris 2012)。

オクタン価向上剤としてのエタノールの長所にもかかわらず、図1は1985～1990年にその使用が停滞したことを示している。これには次の4つの主要な理由があった。

1. ドライバーが、自分の車両へのエタノールの適合性に懸念を持つようになった。燃料噴射装置が1985モデル年に導入されたが、これにはガソリン中の不純物 (主にオレフィンおよびジオレフィン) によって詰まるという多くの問題があった。エタノールが多くの市場に同時に入ったため、これらの不具合の原因とされた。そのため、一部の車両所有者マニュアルにエタノールに対する警告が記載されるようになり、全米計量会議は、ガソリン・スタンドに「アルコールを含有しない」と掲示することを推奨した。1986年までに28州でこれらの掲示が義務付けられた (Herman 1989)。

2. 企業平均燃費（CAFE）基準のための米国運輸省道路交通安全局（NHTSA）の燃費試験システムが、エネルギー密度が低いという理由でエタノール混合物を不利に扱った。CAFEを最初に実施して以来、エタノールと、ガソリンに行ったその他の変更に合わせて、NHTSAは燃費の会計方法を変更した。1988年、NHTSAは、当時使用されていたさまざまな認証燃料の発熱量のわずかな違いを補正するために、CAFEの計算に「R因子」を導入した（Sluderら2014、EPA2014）。NHTSAは、このR因子によってE10の低い発熱量を説明できるようになったが、さらに高いエタノール混合物を含有する燃料が不利にならないように調整する必要があることが最近の研究で示された（SluderおよびWest2013、Sluderら2014）。
3. エタノールはガソリンのRVPを上昇させる。ガソリンのRVPは9psiという規制限度を超えていた（実際には、E10混合物での1psiの蒸気圧増加を許容するEPAの適用除外により、E10の実用上の限度は10psiである）。これは主に、エタノールを低RVPの混合基材にマッチブレンドする（これは生産コストを上昇させたであろう）代わりに、既存のガソリンにスプラッシュブレンドしたためである（MathPro Inc. 2011）。これに対応して、議会はE10（あらゆるエタノール混合物の中でRVPが最も高い²）に、RVPの限度から1psiの適用除外を与えた。これは1990年の改正CAAで成文化された。
4. ガソリン価格が1985年に急落し、エタノールの競争力が低下した。1929～2016年の間で最も低い3年ガソリン価格は1986～1988年のものであった。

2.3. 1990～2005年：大気質が含酸素添加剤使用の動機付けに

ガソリンの酸素含有量を増やすとCOや揮発性有機化合物などの基準汚染物質を低減できるため、古い技術のエンジンと車両の夏季対流圏オゾン濃度を低下させることができる（European Fuel Oxygenates Association 2006）。さらに、含酸素添加剤は鉛と違ってオクタン価を保持しつつ、触媒コンバーターを使用してこれらの排出物とNO_xをさらに低減できる。

1990年の改正CAAは、車両から排出される汚染物質の低減に向けた重要な段階であった（EPA 2017）。この改正は議会から広い支持を得てすぐに可決され、成立した。この改正には、次のようないくつかの独自の市場主導型メカニズムが含まれていた。

- 性能ベースの基準、銀行取引、および商取引を使用して排出要件に適合しやすくする。
- 代替燃料を使用可能にして保有車両基準を満たす。
- 石炭と天然ガスに含まれる硫黄を低減する³。
- バイオ燃料市場を創出して石油の輸入を減らす。
- 公益事業者による省エネルギーを推進する⁴。

産業界は、車両排出量を低減するための含酸素添加剤要件を組成測度より好んだ。これは、エタノール（35重量パーセントの酸素）、MTBE（18%）、またはエチル tert-ブチル・エーテル

² E15、E20といった、より高いエタノール混合物での蒸気圧の上昇がE10の場合より統計的に高いことは分かっている。

³ クリーンな石炭と天然ガスに置いたこのプログラムの重点が制定され、酸性雨が減少した。

⁴ 改正の市場ベースのアプローチは、公益事業者が消費者に省エネルギーを推進すると同時に、ますます厳しくなる排出基準を満たせるように考案された。

(16%)によって組成測度を満たせるためである。これら3つの選択肢はすべて、オクタン価向上剤であるというさらなる利点を有している。1990年の改正CAAへの適合を促進するために、エタノールに対する連邦物品税の免除措置が10年間延長された(European Fuel Oxygenates Association 2006)。

39の不適合地域における冬季CO排出量を低減するために、含酸素ガソリン・プログラムが1992年11月に制定された。このプログラムは、これらの地域におけるガソリンが2.7重量パーセントの酸素を含有することを要求した。多くの精製業者にとってMTBEが望ましい含酸素添加剤であったため、その使用量は1992年と1993年にすぐに拡大した(図1参照)。一方、エタノールの使用量は横ばいに留まった。

CAAは、次いで1994年にオゾン汚染不適合地域に改質ガソリンを要求した。オゾンに不適合でCOには適合する地域の改質ガソリンは、2.1重量パーセント以上の酸素を含有しなければならなかった。エチルtert-ブチル・エーテルはこの酸素をガソリンに添加する1つの方法であったが、この物質はMTBEやエタノールと比べてコスト競争力が低かったため、米国市場では大きな弾みがつかなかった(TraiprasertpongおよびSvang-Ariyaskul 2012)。その結果、MTBEの使用量が1995年に再び急増した。ところが、米国地質調査所は、MTBEが都市の地下水源にしばしば見られることを1997年に報告した(Laphamら1997)。漏れ出したMTBEは、エタノールやガソリン成分より速く、より深く土壤に浸透し、自然の生物分解耐性がより高いため、エタノールやガソリン成分より容易に飲用水を汚染する(EPA 1998)。そのため、段階的なエタノールへの移行が州政府と燃料供給業者に促されることになった(ICIS 2006)。エタノールは、一般に好まれる含酸素添加剤として2004年に次第にMTBEを追い越した。最終的に、MTBE汚染による水質問題の結果、ガソリンへのMTBE混合は2006年に全国的に停止された。これは、ほとんどの場所ですでにその使用が止められてからかなり後のことであった。

改質ガソリン・プログラムのフェーズIは1995年に始まり、よりクリーンに燃焼するガソリンの使用が要求される地域に排出上の大きな便益をもたらした。フェーズIIは、米国内で最も大気質の悪い地域での排出量をさらに低減した。加えて、地域は改質ガソリン・プログラムへの参加を自発的に決めることができた。初期の改質ガソリンにはMTBEが含まれていたが、改質ガソリン・プログラムによる利益はMTBEを使用しなくても実現可能であるとEPAは判断した。EPAによるこの判断の結果、ガソリンへのMTBEの使用を削減する規制が可能になった(EPA 1999)。さらに、RFG地域に対する酸素義務があったが、これは2005年のエネルギー政策法によって廃止された。したがって、MTBEは多くの州で使用禁止となっていたため、燃料が複合モデルの排出限度を満たす限り、EPAはRFGが必須の酸素成分を有していなくてもよいとした。

含酸素添加剤プログラムは、ガソリンに対する正確な要件の決定を各州の自主性に委ねた。コンプライアンスを達成するための地域的な排出量削減ニーズは極めて多様なため、場所ごとにそのニーズ固有の燃料が計画されたことにより「ブティック」燃料の数が急増した。これは、ガソリン販売業者がさまざまな液体燃料を扱うことができることを示すが、議会は2009年のバイオ燃料削減法で排出関連の多様化を制限し、供給業者がその製品をさらに容易に販売できるようにした。それでも、現時点で15通り(各配合の中級グレードとプレミアムのバージョンを除く)の異なる「ブティック」ガソリン配合が存在する(National Association of Convenience Stores 2016)。

2.4. 2005～2016年：エネルギー安全保障と気候保護がエタノール使用の動機付けに

MTBE からエタノールへの地域的な移行の効果を認識した議会は、2005年のエネルギー政策法で改質ガソリンに対する含酸素添加剤要件を撤廃し、再生可能燃料基準（RFS）でそれを置き換えた（EPA 2016a）。RFSは、自動車燃料に含まれる再生可能燃料の割合を増やす（主にバイオ燃料によって満たされる⁵）ことを要求している。これは外国産石油への依存度を減らし、温室効果ガス（GHG）排出量を低減する。この時点で、RFS（およびそれに続く2007年のRFS2）がエタノールの使用量を増やす大きな推進力となった。E10は（それより高い混合物とは対照的に）、ガソリン供給業者がRFS要件を満たすための明確な選択肢であった。なぜなら、オクタン価向上剤としてのその完全な価値を従来型車両で実現可能であり、燃料補給インフラと適合したからである。RFS2の年間目標（図2参照）は、この法律が成立した時点でのガソリンとディーゼルの消費量に基づいて設定された。その時点で最新のガソリン消費量を使用することは、E10を完全に市場に浸透させることが従来のエタノール生産技術で達成可能なことを意味していた。業界が希望したのは、エタノール使用に対するRFS2の量が従来のエタノール生産量に比べて十分積極的なものであれば、セルロース系エタノール生産の経済的障壁を法的義務によって低減できることであった。さらに、エタノール含有量の多い燃料（E10超）を使用できる車両が市場に導入され、従来の原料とセルロース系原料の両方から製造したエタノールの利用がさらに増えるであろう。

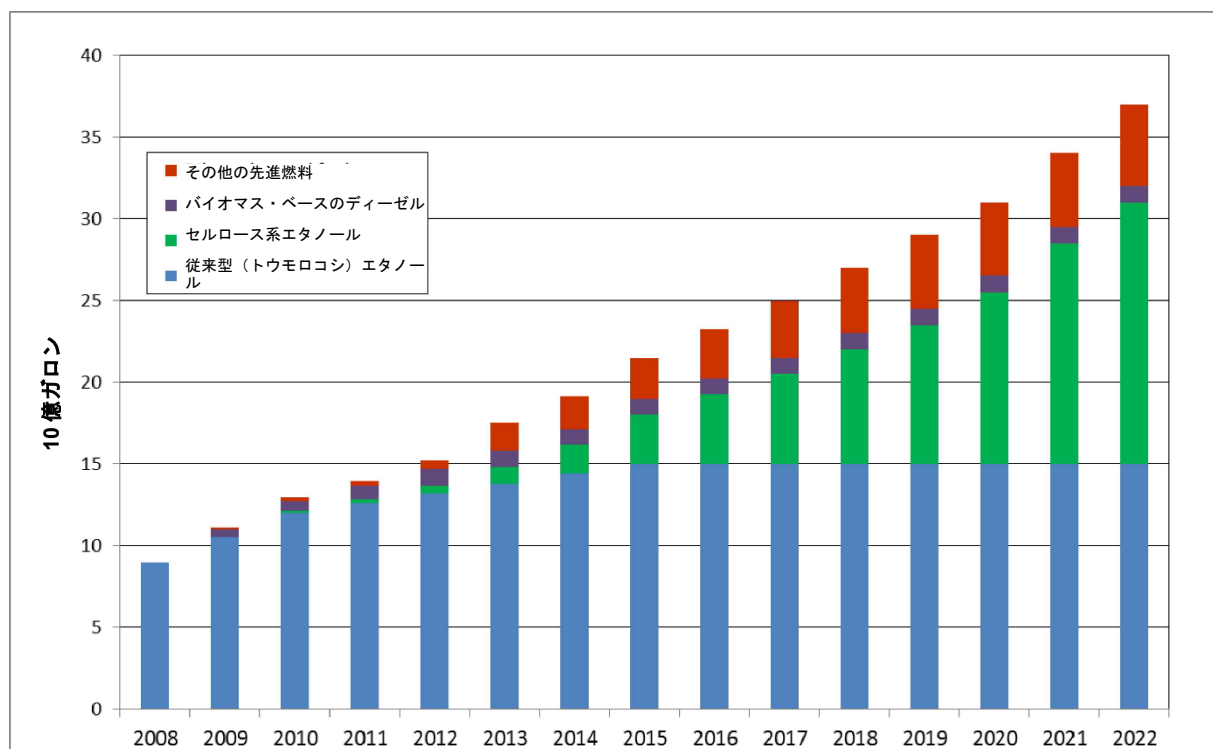


図2 RFS2で制定された年別バイオ燃料量

出典：代替燃料データ・センター

⁵ RFSの量のほとんどがトウモロコシ・エタノール、セルロース系エタノール、バイオディーゼル、再生可能ディーゼルなどのバイオ燃料で満たされてきたが、このプログラムは、都市固形廃棄物から生成される天然ガスなど、その他の原料から生産される燃料を考慮に入れている。

EPA は、GHG を CAA 汚染物質として規制するための許可を 2007 年に得た (Coalition for Responsible Regulations, Inc. 対 EPA 2012)。この決定は、GHG の排出が地球の気候に直接的な影響を及ぼすため、米国民の健康と福利に直接的な影響を及ぼすという科学的証拠に基づいていた (Intergovernmental Panel on Climate Change 1990)。EPA は、その新たな GHG 限度を軽量自動車 (LDV) の CAFE プログラムと連動させて 2012 モデル年に初めて適用した。EPA は、GHG 排出量を算出するのに E10 のエタノール含有量を考慮に入れるが、ライフサイクル GHG 排出量ではなく排気管 GHG 排出量に着目する。その結果である基準は、E10 に対する NHTSA の CAFE 規則とよく一致している (Federal Register 2012)。

E10 は 2010 年までにほぼ完全に市場に浸透したが (National Research Council 2011)、一部の政策と試験手順は依然遅れている。エタノールを含有しないガソリン (E0) は、2017 年までティア 2 排出基準と CAFE および GHG 規則の認証燃料のまま残った。次に、ティア 3 排出基準がティア 2 を置き換え、E10 が試験燃料として段階的に導入され始めた。大手 OEM によって製造された LDV が 2020 モデル年までに E10 を排出試験用に使用し始め、残りの LDV と HDV も 2022 モデル年までに E10 を試験燃料として使用するはずである (EPA 2014)。

3. E85 およびフレックス燃料車

3.1. E85 規則

E85 (フレックス燃料と呼ばれることもある) は、51~83 体積パーセントのエタノールを含有する燃料を指すマーケティング用語である。E85 はこれまで長い間、輸送とインフラのコストを最小限に抑えてエタノール使用量を増加させる方法と見なされてきた。これは、濃縮度を高めた形態で使用すると、同じ量のエタノールがその原料のより近くで使用可能であり、経由するターミナルと燃料給油所を減らして輸送できるため、達成可能であった。このエタノール市場は、ガソリン中の含酸素添加剤としてエタノールの代わりに MTBE が使用されている場合に特に重要であった。E10 市場が飽和状態である今、エタノールの支持者は、E85 燃料がエタノールの使用を拡大し、したがって排出量と石油の使用量を低減する最も可能性の高い方法の 1 つと見なしている (Babcock および Pouliot 2013)。

20 年以上市場に出回っているにもかかわらず、米国における E85 の使用は依然として極めて限られている。E85 市場を拡大するのが困難な理由の 1 つは、レギュラー・ガソリン車や燃料補給インフラに適合していないことである。そのため、この技術の採用に向けて市場を推し進めるために多くの法律が成立したが、ほとんど成功していない。市場推進策は、消費者向け、燃料供給業者向け、および車両製造業者向けの 3 本の柱を持つものであった。法律は、フレックス燃料車 (FFV) の生産と販売を奨励すると同時に、この燃料のための市場 (生産、インフラ、分配) を開発し、燃料と車に対する消費者の需要を開拓しようとするものであった。

3.2. フレックス燃料車

E85 は、E10 と異なりレギュラー・ガソリン車で使用できないため、市場において燃料をとるか、車両をとるかという難しい問題をまず扱わなければならなかった。E85 に関するこの「ニワトリが先か、卵が先か」のジレンマは、E0、E85、またはその中間のあらゆる混合レベルで走ることができる FFV の開発によって軽減された。

これらの車両の開発は、1988 年の代替自動車燃料法によって拍車がかかった。この法律は、CAFE 基準にある会計機構を通して FFV を生産することを自動車メーカーに奨励した。この会計機構

では、FFVの燃費を算出するのにE85のガソリン部分のみ考慮し、E85は85体積パーセントのエタノールと想定した。したがって、ガソリンで25マイル/ガロン (mpg)、E85で19 mpg 走る車両であれば、ガソリンでは127 mpgとなると仮定された(数式1)。さらに、FFVに対するCAFE規則は、FFVが50%の割合でE85を使用すると仮定した。したがって、ガソリンで25 mpgを達成するのと同じFFVは、CAFE会計で42 mpgの効率を持つ車両と見なされるであろう(数式2による)。

$$\text{E85 での FFV 燃費} = \frac{19 \text{ mpg}}{\frac{0.15 \text{ ガロン} \cdot \text{ガソリン}}{1 \text{ ガロン E85}}} = 127 \text{ mpg ガソリン} \quad (1)$$

$$\text{CAFE FFV 燃費} = \frac{1}{\frac{0.5}{127 \text{ mpg}} + \frac{0.5}{25 \text{ mpg}}} = 42 \text{ mpg ガソリン} \quad (2)$$

このCAFEの利益は潜在的に大きすぎると考えられたため、FFVが製造業者の保有車両CAFE平均に与える可能性のある全体的利益は1.2 mpgに制限された。それでも、それはFFVを開発して市場に出すことをOEMに促す大きなインセンティブであった。フォードは1996年にまずトーラスFFVを発売した(Dever 1996)。このインセンティブは、2006年までに600万台のFFVを販売するに十分であった(O'Connor 2007)。しかし、2007年のエネルギー自立・安全保障法では、1.2 mpgの上限値を0.2 mpg刻みで減らして2015年と2019年の間にこのインセンティブを段階的になくす予定であった。2020モデル年以降については、FFVが50%の割合でE85を使用すると想定するのではなく、現場で実証/予想される使用に基づいて代替燃料とガソリンの使用に重みを付ける(Powell 2015)。このインセンティブはFFVを市場に出すことには成功したが、E85の堅固な市場創出を妨げる問題がいくつかあった。

E85はエネルギー密度がガソリンより低く、FFVのエンジンはオクタン価の上昇が燃費の改善に完全につながるようには最適化されていないため、E85を使用したFFVは燃費がおよそ23%悪化する。しかし、この燃費の差は燃料中のエタノールの量に依存する。通常、E85の価格はガソリンの価格より11%~17%低いに過ぎない(Fuels Institute 2014)。つまり、ドライバーのマイル当たり燃料コストはE85を使用したときの方が高い。そのため、FFV所有者がE85を使用しようという気持ちをそいでいる。

CAFEインセンティブに加えて、一連の保有車両インセンティブを通してFFVの購入が奨励されてきた。最も大きなインパクトを持つインセンティブは、60万台(U.S. Department of Energy 2016)という世界最多の車両を保有する連邦保有車両に焦点を当てたものである。1992年のエネルギー政策法は、大都市圏で取得されるLDVの少なくとも75%が代替燃料車(AFV)であることを要求した。FFVは単純にガソリンで走行できるため、この要件を完全に満たすのに最適な車両であった。次いで2005年のエネルギー政策法は、燃料を入手できないために適用除外にされない限り、すべての連邦FFVがE85を使用しなければならないことを義務付けてE85の使用を奨励した。2007年のエネルギー自立・安全保障法は、低GHG排出車以外の車両の取得を禁止することにより、連邦のFFV購入をさらに奨励した。FFVは、会計上の低GHG排出車である。

3.3. インフラ

現在、米国には 3,860 の E85 給油所がある。これはガソリン給油所のおよそ 2%に当たる (U.S. Department of Energy 2020)。給油所の地理的分布はさまざまである。例えば、ミネソタ州には 416 の E85 給油所があり、米国のその他の地域より比較的密度が高い。市場分析者は、新しい燃料の不便さを許容可能な水準まで低減するには、ガソリン給油所の 20%でその燃料が提供される必要があると推定している (Johnson ら 2015)。図 3 に、1998 年と 2002 年に 2 つのわずかな減少が見られるものの、E85 給油所の数が 1992 年以来増えつつあることを示す。この成長は多くの政策の後押しを受けたものである。

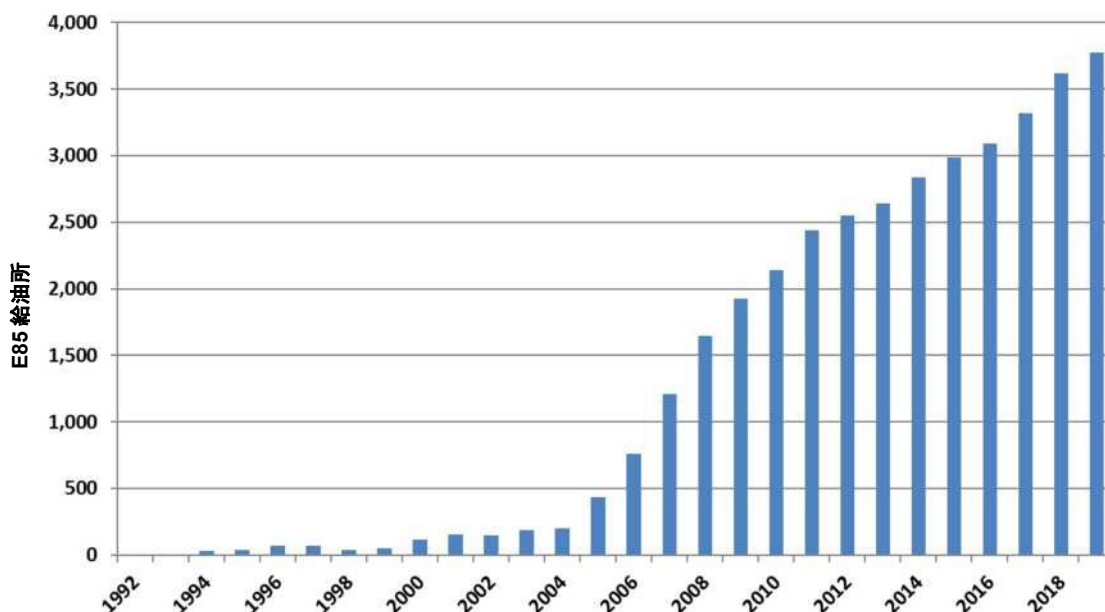


図 3 米国内の年別 E85 給油所数

出典：代替燃料データ・センター

図 3 はまた、E85 給油所数の伸びが 2005 年に大きく加速したことも示している。これは、3 万ドルを上限として E85 給油所のコストの 30%を税額から控除する代替燃料インフラ税控除の開始と時を同じくしている (U.S. Department of Energy 2014a)。この税額控除は、30%か 50%のいずれか (上限は 5 万ドル) で何度も遡って延長された。

給油機で E85 を安全に給油できるようにするには、いくつかの段階を踏まなければならなかった。給油所の認可は管轄権を有する当局に委ねられる。多くの給油所は、給油機が適合しているかどうかを知るための広範な試験が行われる前に認定されていた。UL は、E85 給油機の認定要件を 2007 年によく制定した (UL Subject 87A-E85) (UL 2007)。今では、管轄権を有する当局が E85 給油所に要求できるこの認定を有する多くの給油機がある (U.S. Department of Energy 2016c)。対照的に、MTBE を含む UL リスティングはこれまでまったくない。

E85 は非 FFV 車を損傷する可能性があるため、連邦取引委員会は E85 給油機にその旨を表示することを義務付けている。このルールとそれに関連するラベルを制定するのに時間がかかっていた間に、管轄権を有する多くの当局、州政府、および地方政府が独自のラベリング要件を制定した。さらに、ほとんどの給油所は、E85 に (FFV の黄色燃料タンク・キャップに合った) 黄

色のノズルを使用して誤給油を低減している（図4）。



図4 FFVの黄色燃料タンク・キャップとそれに合う給油機のノズル

出典：国立再生可能エネルギー研究所 32163 および 32153

補助金プログラムも E85 給油所の設置に役立った。さまざまな資金源から多くの資金提供のうねりがあったが、最も重要なのは 2009 年のアメリカ復興・再投資法であった。アメリカ復興・再投資法は代替燃料と先進自動車プロジェクトに 3 億ドルを提供し、その一部は 67 の FFV 給油所に供与した (U.S. Department of Energy 2014b)。ほとんどの連邦インフラ補助金は、補助金受領者が公共車両へのアクセスを提供することを義務付けている。2015 年、米国農務省農家サービス局はバイオ燃料インフラ・パートナーシップ・プログラムを発表した。このプログラムは、E15 および E85 給油機を設置する約 865 の給油所に 8,200 万ドルの連邦資金と費用分担補助金を最終的に供与した (U.S. Department of Agriculture 2015)。業界の景気刺激プログラムもまた、E10 を超えて入手可能性を拡張する給油所に資金を供与した。

インフラ開発を援助し、FFV を路上で走行させるために保有車両が使用された。2007 年のエネルギー自立・安全保障法は、あらゆる連邦給油センターに再生可能燃料ポンプを設置しなければならないことを義務付けた。

3.4. インセンティブ

セクション 2 で論じた、トウモロコシとエタノールの生産インセンティブのほとんどは E85 のエタノール部分にも適用される。これには、1980 年から 2011 年まで続いた一連の税額控除が含まれる。しかし、E85 はいくつかの基本的な点において異なっていて、米国内で販売できるようにするために法的措置を必要とした。

講じる必要があった最初の措置は、1992 年のエネルギー政策法に定められたプロトコルに基づいて、DOE が E85 を燃料として登録することであった (U.S. Congress 1992)。E85 はガソリンに「実質的に類似」していないため、直ちに登録しなかった。この認識は、E85 が 1990 年の改正 CAA に基づいて「クリーンな代替燃料」と定義されたときに、E85 について確認された。

4. E15

4.1. E15 を許可するための規則

E15 は、ガソリンに 10.5%~15%のエタノールを混合したものである (EPA 2015)。E85 と同様に、E15 もいわゆるエタノール混合物の壁を乗り越える方法と見なされる。CAA は、車両とエンジンが排出基準を満たすことを認定するために使用された既存の燃料と燃料添加剤に「実質的に類似」していない新しい燃料や燃料添加剤を許可していない。排出基準を満たす上で、車両とエンジンにマイナスの影響がないことを示すデータが提供されれば、新しい燃料や燃料添加剤に適用除外を与えることができる。エタノール産業グループであるグロス・エナジーと 54 のエタノール・プラント所有者は、E15 に対する適用除外申請を 2009 年 3 月に提出した (EPA 2012)。DOE のオークリッジ国立研究所と国立再生可能エネルギー研究所は、車両、エンジン、または人間の健康に悪影響を及ぼさないことを示すデータをエタノール業界と共同で策定した (McCormick ら 2013)。2009 年 3 月、EPA は 2007 モデル年以降の LDV に E15 を承認する部分的適用除外を発行し、追加データをレビューした後、この適用除外を 2001 モデル年以降の LDV に拡張した (Federal Register 2011)。申請時のデータ不足により、この適用除外は大型ガソリン車、オートバイ、特定エンジン、および特定装置 (ボート、スノーモービル、芝刈り機、リーフ・ブロワー、および類似の小型エンジンを含む) に E15 を使用することを禁止している。

4.2. E15 規則

州および地方当局は、連邦レベルで課される要件を超える燃料関連の追加要件を有している可能性がある。EPA の交通・大気汚染管理局は、2001 モデル年以降の LDV とトラックにのみ使用が許可されている E15 の誤給油リスクを低減するために、E15 の販売要件を策定した。これらの規則は E10 ガソリン、ディーゼル、またはその他の再生可能燃料には適用しない。E15 を販売する給油所は以下の要件に従わなければならない。

1. EPA が承認した E15 ラベルを給油機に貼り付けなければならない。
2. EPA が承認した誤給油低減計画 (再生可能燃料協会から無料で入手できる) を採用しなければならない (EPA 2012)。
3. E15 を使用するためのすべての燃料配送に製品輸送書を添付しなければならない。
4. 給油所は燃料品質調査に参加しなければならない。
5. E15 に含まれるエタノールは ASTM D4806 を満たさなければならない。2019 年現在、E15 は E10 と同じ RVP 1 ポンドの適用除外対象である (EPA 2019)。
6. 給油所は、EPA が承認した給油機とホースの構成を使用しなければならない。選択肢には以下が含まれる。
 - a. E15 専用ホース
 - b. 4 ガロン以上購入する場合の E0/E10/E15 共用ホース (これには「4 ガロン以上」ラベルを表示しなければならない)
 - c. E10 以下を販売するための専用給油機

EPA 地下貯蔵タンク局は、上記規則に加えて連邦規則集タイトル 40、パート 1、サブチャプター 1、パート 280~282 に従って地下貯蔵タンクを規制する。この規則は、E10 を超えるエタノール混合物に対する適合性要件を追加して、連邦規則集タイトル 40、パート 1、サブチャプター 1、

パート 280.32 で 2015 年 7 月に更新された。タンク、配管、封じ込め水溜め、揚水装置、放出検出装置、流出対応装置、および過充填対応装置は、貯蔵する燃料と適合していなければならない。E10 を超える混合物を貯蔵する給油所は、

1. E10 超の混合物を貯蔵する 30 日前に、実施機関（通常は州政府事務所）に通知しなければならない。
2. 適合する装置を使用し、以下の 3 つのいずれかで適合性を実証しなければならない。
 - a. 独立試験所による装置の認証／一覧表作成
 - b. 特定範囲のバイオ燃料混合物との適合性を確認する、装置またはコンポーネント製造業者の書面による承認
 - c. 人間の健康と環境に同様に保護効果があると実施機関が決定した、その他の方法の使用
3. E10 を超える混合物の全貯蔵期間にわたる適合性実証記録を維持しなければならない。

石油設備協会と鋼製タンク協会は、特定範囲のバイオ燃料混合物との適合性を確認する製造業者のレターを掲載したウェブサイトを維持している。給油所所有者が製造業者のレターを使用すると連邦規則の要件が満たされる (Petroleum Equipment Institute 2016、Steel Tank Institute 2012)。

4.3. E15 インセンティブ

E15 に対する唯一の連邦インセンティブは、E10 を超えるエタノール混合物の入手可能性を広げようとする、2015 年の米国農務省のバイオ燃料インフラ・パートナーシップであった (U.S. Department of Agriculture 2015)。このバイオ燃料インフラ・パートナーシップは、給油所にエタノール・インフラを設置することを望む州に向けた競争的補助金プログラムであった。このプログラムで 8,200 万ドルの費用分担基金が提供された一方、州（州・民間パートナーシップを含む）もこれに適合する追加費用分担を提供した。21 州が E15 および／または E85 インフラ資金の供与先に選定された。このプログラムは、3,500 を超える供給システムと 180 のタンク・システムを含む約 865 の給油所に資金を供与した。エタノール業界は、景気刺激などのプログラムを通して E15 インフラに資金を供与している (Retka Schill 2014)。

4.4. 結論

エタノールは現在、多くの理由により米国で最も多く消費されている非石油輸送燃料である。まず、そのオクタン価が高いことによってエンジン性能が向上する。第 2 に、それぞれ異なるニッチと市場を持つ 3 つの区別された燃料 (E10、E15、E85) に導入されている。最後に、エタノールは大気質、エネルギー安全保障、気候変動、およびエンジン性能に関連する多くの政策目標を米国が達成するのに役立つ。これらの目標は、エタノールを追求する主な動機付け要因という役割を常に交代で担ってきた。しかし、全体として、エタノールが我が国の燃料供給の恒久的かつ重要な構成要素であることを可能にする一貫した長期サポートを提供した。

5. 参考文献

Babcock, Bruce A. and Sebastien Pouliot. 2013. "Price It and They Will Buy: How E85 Can Break the Blend Wall." CARD Policy Briefs, Paper 13.
http://lib.dr.iastate.edu/card_policybriefs/13.

Bechtold, Richard L. 1987. *Compendium of Significant Events in the Recent Development of Alcohol Fuels in the United States*. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory. Report ORNL/Sub/85-22007/1.

Bechtold, Richard L., Marc B. Goodman, and Thomas. A. Timbario. 2007. *Use of Methanol as a Transportation Fuel*. Report prepared for the Methanol Institute.

Coalition for Responsible Regulations, Inc. et al. v. Environmental Protection Agency. 2012. United States Court of Appeals. No. 09-1322.

Colucci, Joe M. 2013. “Where Will The Octane Come From?” Presentation at the *SAE 2013 International High Octane Fuels Symposium*, Washington, D.C., January 29, 2013.

Crude Oil Windfall Profits Tax of 1980, Pub. L. No. 96-223, 1980.

Dever, Paul. 1996. “Alternative Fuel Ford Taurus.” 1996 North American International Auto Show Press Release, January 1996. Accessed March 15, 2016.

<http://www.theautochannel.com/news/date/19960123/news00023.html>.

Energy Tax Act, Pub. L. No 95-618, 1978.

European Fuel Oxygenates Association. 2006. “MTBE Resource Guide.”

https://www.sustainablefuels.eu/assets/uploads/2018/08/20100715142838-mtbe_resource_guide_-_2006_revision.pdf

Federal Register. 1979. “Fuels and Fuel Additives: Gasohol; Marketability.” *Federal Register*, April 6, 1979. Accessed March 22, 2016.

Federal Register. 2011. “Environmental Protection Agency [EPA–HQ–OAR–2009–0211; FRL–9258–6], Partial Grant of Clean Air Act Waiver Application Submitted by Growth Energy to Increase the Allowable Ethanol Content of Gasoline to 15 Percent; Decision of the Administrator.” *Federal Register*, Vol. 76, No. 17, January 26, 2011. Accessed August 8, 2016.

<https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2011-01-26/pdf/2011-1646.pdf>.

Federal Register. 2012. “2017 and Later Model Year Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas Emissions and Corporate Average Fuel Economy Standards.” *Federal Register*, November 15, 2012. Accessed March 8, 2016.

Fuels Institute. 2014. “E85: A Market Performance Analysis and Forecast.” Accessed March 16, 2016.

<https://www.fuelsinstitute.org/Research/Reports/E85-A-Market-Performance-Analysis-and-Forecast>

Ghosh, Prasenjeet, K.J. Hickey, and S.B. Jaffe. 2006. “Development of a Detailed Gasoline Composition-Based Octane Model” *Ind. Eng. Chem. Res.* 45 (1): 337–345.

DOI:10.1021/ie050811h.

Herman, Marilyn J. 1989. *Survey of Federal and State Oxygenated Fuel Regulations: Motor Fuel Laws and Tax Incentives*. Washington, D.C.: Herman & Associates.

ICIS. 2006. “Timeline: A Very Short History of MTBE in the US.” Accessed March 8, 2016.

<http://www.icis.com/resources/news/2006/07/05/1070674/timeline-a-very-short-history-of-mtbe-in-the-us/>.

Intergovernmental Panel on Climate Change. 1990. *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge, MA: Cambridge University Press.

Lapham, W.W, Neitzert, K.M., Moran, M.J., and Zogorski, J.S., 1997. USGS compiles data set for national assessment of VOCs in ground water: *Ground Water Monitoring and Remediation*, v. 17, no. 4 p. 147-57.

Johnson, Caley, Emily Newes, Aaron Brooker, Robert McCormick, Steve Peterson, Paul Leiby, Rocio Uria-Martinez, Gbadebo Oladosu, and Maxwell L. Brown. 2015. *High-Octane Mid-Level Ethanol Blend Market Assessment*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. Report No. NREL/TP-5400-63698.

MathPro Inc. 2011. “Refining Economics of a National Low Sulfur, Low RVP Gasoline Standard.” Accessed March 8, 2016.
http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT04_Tier3_Report_Final_v4_All.pdf.

McCormick, Robert, Janet Yanowitz, Matthew Ratcliff, and Bradley Zigler. 2013. *Review and Evaluation of Studies on the Use of E15 in Light-Duty Vehicles (Technical Report)*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. Prepared for the Renewable Fuels Association.
<http://www.ethanolrfa.org/wp-content/uploads/2015/09/RFA-NREL-Review-and-Evaluation-of-E15-Studies.pdf>.

Morris, David J. 1992. *Ethanol Policy and Development: 1978–1992*. Minneapolis, MN: Institute for Local Self Reliance.

National Association of Convenience Stores. 2016. “The U.S. Petroleum Industry: Statistics, Definitions.” Accessed March 8, 2016.
http://www.nacsonline.com/yourbusiness/fuelsreports/gasprices_2013/pages/statistics-and-definitions.aspx.

National Research Council. 1991. *Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution*. Washington, D.C.: National Academies Press.

National Research Council, Committee on Economic and Environmental Impacts of Increasing Biofuels Production. 2011. *Renewable Fuel Standard: Potential Economic and Environmental Effects of US Biofuel Policy*. Washington, D.C.: National Academies Press.

O’Connor, J.K. 2007. *Historical Perspective of Clean Cities and Alternative Fuels Data Center Trends*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-540-41069.
www.nrel.gov/docs/fy07osti/41069.pdf.

Peebles, J.E. 1991. “The Clean Air Act: A Brave New World for Fuel Reformulation.” *Fuel Reformulation* 1: 27–31.

Petroleum Equipment Institute. 2016. “UST Component Compatibility Library.” Accessed March 8, 2016. <http://www.pei.org/ust-component-compatibility-library>.

Powell, Gregory. 2015. “Alternative Fuels in CAFE Rulemaking.” Presented at *SAE Government and Industry Meeting*, Washington, D.C., January 21, 2015.

Retka Schill, Susanne. 2014. “Prime the Pump Seeks to Expand E15 Infrastructure.” *Ethanol Producer*

- Magazine*, December 10, 2014. Accessed March 22, 2016.
<http://www.ethanolproducer.com/articles/11734/prime-the-pump-seeks-to-expand-e15-infrastructure>.
- Round, George. 1973. George Round Oral Histories, Agricultural Communications Records, RG-08-16-05. Archives & Special Collections, University of Nebraska-Lincoln Libraries.
<https://archives.nebraska.edu/repositories/8/resources/1413> Accessed July 13, 2020.
- Sluder, C.S. and B.H. West. 2013. *Preliminary Examination of Ethanol Fuel Effects on EPA's R-Factor for Vehicle Fuel Economy (Technical Report)*. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory. ORNL/TM-2013/198.
- Sluder, C.S., B. West, A. Butler, A. Mitcham, and W.J. Ruona. 2014. "Determination of the R Factor for Fuel Economy Calculations Using Ethanol-Blended Fuels over Two Test Cycles." *SAE Int. J. Fuels Lubr.* 7 (2): 551–562. doi:10.4271/2014-01-1572.
- Smith, William Ed, IV and William E. Morris. 2012. "RVP Blending Values Listed for Light HCs." *Oil & Gas Journal* 110 (10):100–101. Accessed March 8, 2016.
- Splitter, D., A. Pawlowski, and R. Wagner. 2016. "A Historical Analysis of the Co-evolution of Gasoline Octane Number and Spark-Ignition Engines." *Frontiers in Mechanical Engineering* 1: 16.
doi:10.3389/fmech.2015.00016.
- Steel Tank Institute. 2012. "Steel and Alternative Fuels." Accessed March 8, 2016.
<http://www.steeltank.com/FabricatedSteelProducts/ShopFabricatedTanks/SteelandAlternativeFuels/tabid/465/Default.aspx>.
- Traiprasertpong, P. and A. Svang-Ariyaskul. 2012. "Process Simulation of Ethyl Tert-Butyl Ether (ETBE) Production from Naphtha Cracking Wastes." *World Academy of Science, Engineering and Technology* 64: 1033–1038.
- Underwriters Laboratories. 2007. "Underwriters Laboratories Announces Development of Certification Requirements for E85 Dispensers." October 16, 2007. Accessed March 17, 2016.
<http://www.ul.com/wp-content/uploads/2014/04/e85certificationrequirements.pdf>.
- U.S. Congress. 1992. Energy Policy Act. H.R. 776. Accessed July 30, 2020:
<https://afdc.energy.gov/files/pdfs/2527.pdf>:
- U.S. Department of Agriculture. 2015. "USDA Announces \$210 Million to be Invested in Renewable Energy Infrastructure through the Biofuel Infrastructure Partnership," News Release No. 0300.15. Accessed November 30, 2015.
https://www.usda.gov/wps/portal/usda/usdahome?contentid=2015/10/0300.xml&navid=NEWS_RELEASE&navtype=RT&parentnav=LATEST_RELEASES&edeployment_action=retrievecontent.
- U.S. Department of Energy. 2014a. "Alternative Fuel Infrastructure Tax Credit." Accessed March 17, 2016. <http://www.afdc.energy.gov/laws/10513>.
- U.S. Department of Energy. 2014b. "American Recovery and Reinvestment Act of 2009." Accessed March 17, 2016. <http://www.afdc.energy.gov/laws/arra.html>.
- U.S. Department of Energy. 2020. "Alternative Fueling Stations Counts by State." Accessed March 17, 2016. http://www.afdc.energy.gov/fuels/stations_counts.html.

U.S. Department of Energy. 2016. “Federal Automotive Statistical Tool Data Collection.” Accessed March 17, 2016. https://federalfleets.energy.gov/federal_requirements/reporting/fast.

U.S. Department of Energy. 2016c. “Handbook for Handling, Storing, and Dispensing E85 and Other Ethanol-Gasoline Blends.” Golden, CO: DOE/GO-10216-4854.

U.S. Energy Information Administration. 2016. “Almost all U.S. gasoline is blended with 10% ethanol.” Accessed July 13, 2020. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=26092>

U.S. Environmental Protection Agency. 1998. “MTBE Fact Sheet #2: Remediation of MTBE Contaminated Soil and Groundwater.” Accessed March 8, 2016. <https://archive.epa.gov/oust/mtbe-a/web/pdf/mtbefs2.pdf>.

U.S. Environmental Protection Agency. 1999. “Phase II Reformulated Gasoline: The Next Major Step Toward Cleaner Air.” EPA420-F-99-042. Accessed April 6, 2017. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/00000FG5.PDF?Dockkey=00000FG5.PDF>.

U.S. Environmental Protection Agency. 2012. “Model E15 Misfueling Mitigation Plan.” Renewable Fuels Association. March 2, 2012. Accessed January 5, 2015. <https://www.epa.gov/fuels-registration-reporting-and-compliance-help/e15-fuel-registration#mmp>.

U.S. Environmental Protection Agency. 2014. “Control of Air Pollution from Motor Vehicles: Tier 3 Motor Vehicle Emission and Fuel Standards Rules and Regulations.” Office of the Federal Register. Accessed March 8, 2016. <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2014-04-28/pdf/2014-06954.pdf>.

U.S. Environmental Protection Agency. 2015. “Ethanol Waivers (E15 and E10).” Accessed July 30, 2020. <https://www.epa.gov/gasoline-standards/ethanol-waivers-e15-and-e10>.

U.S. Environmental Protection Agency. 2016a. “Renewable Fuel Standard Program.” Accessed March 8, 2016. <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program>.

U.S. Environmental Protection Agency. 2017. “1990 Clean Air Act Amendment Summary.” Accessed April 6, 2017. <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/1990-clean-air-act-amendment-summary>.

U.S. Environmental Protection Agency. 2019. “Compliance Overview for the E15 RVP and RIN Market Reform Final Rule.” Accessed July 30, 2020. www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/compliance-overview-e15-rvp-and-rin-market-reform-final-rule