

史上最大のエアバッグリコールを公開資料から読み解く

世界的規模のリコールとなったエアバッグインフレーターの破裂原因について、米国NHTSAから発表された報告書や火薬学会誌などを読み解き、技術的視点と管理的視点から再発防止を考える。

小田技術士事務所
代表 小田慎吾

1. 自己紹介
 2. 史上最大のエアバッグ不具合とその原因
 3. 不具合発生の際の経緯
 4. 再発防止のために
- 【補足】偽物インフレーターに注意

1. 自己紹介

氏名：小田 慎吾 (ODA, Shingo)

経歴：**1976年–1995年** (株)ダイセル

エポキシ化合物、酢酸等の有機化学品事業

勤務場所：研究所（総合研究所次長）、工場、本社企画部門

要素技術：**有機化学、触媒化学、化学工学、** **化学および化学工学**

1995年–2017年 (株)ダイセル、(株)ダイセルセイフティシステムズ

エアバッグ・インフレーター事業

職歴：技術開発センター所長(12年)、品質保証担当役員(10年)

要素技術：**火薬工学、構造設計、金属材料工学、他** **自動車部品の設計開発**
品質保証(ISO-9001、IATF16949、FMEA、他) **工程管理・品質保証**

(2009年に無針注射器を提案し、2010年から現職のまま一人で開発開始した)

<https://www.daicel.com/business/new-solution/actranza/>

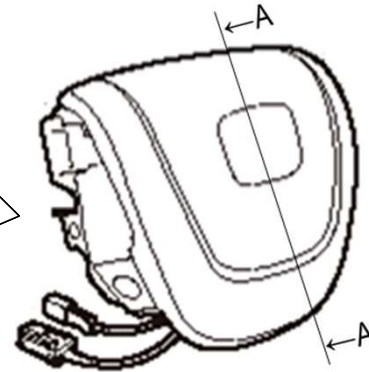
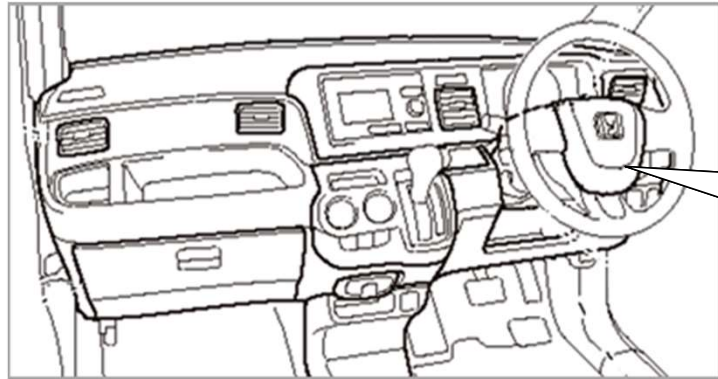
2017年–現在

小田技術士事務所代表

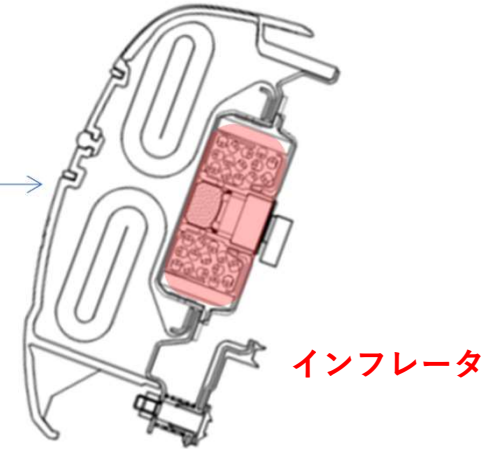
資格：技術士(化学部門)、高圧ガス(甲種化学、第一種販売)、危険物(甲種)

受賞：日本化学会 第49回化学技術賞受賞 (2000年)

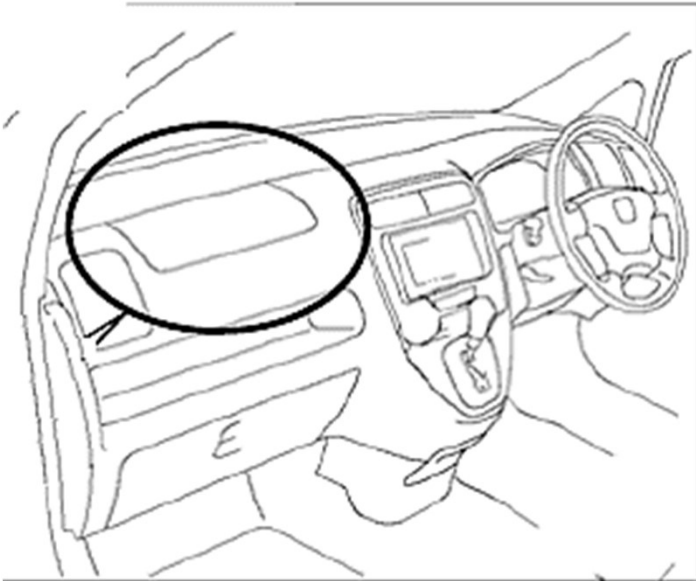
エアバッグ・インフレーターとは



A-A断面

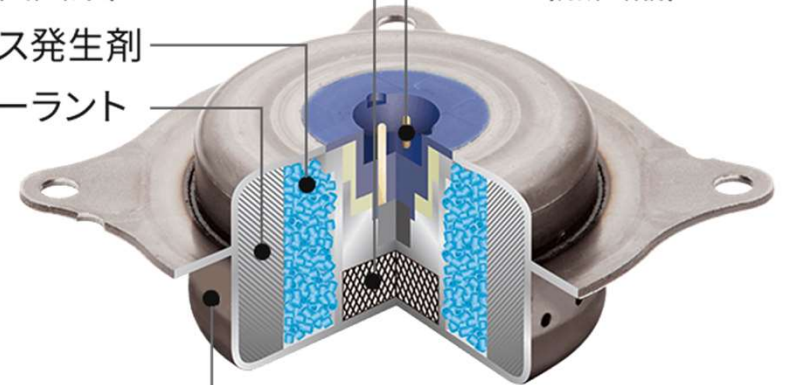


インフレーター



エンハンサ
(伝火薬)
ガス発生剤
クーラント

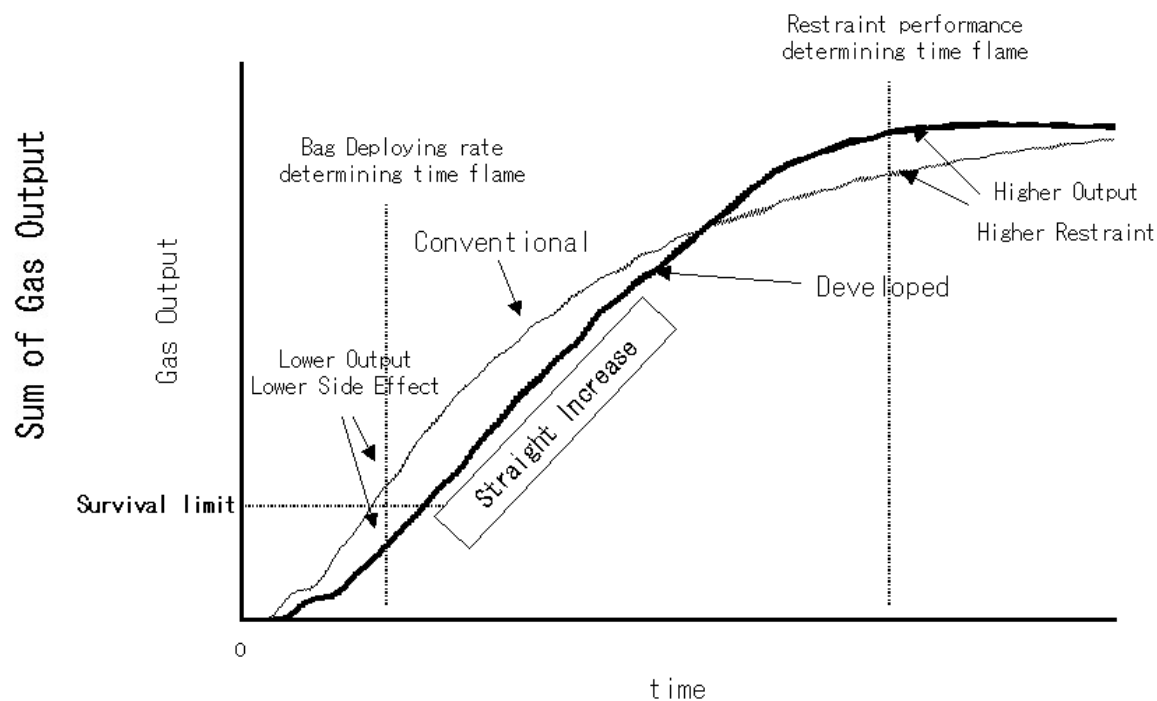
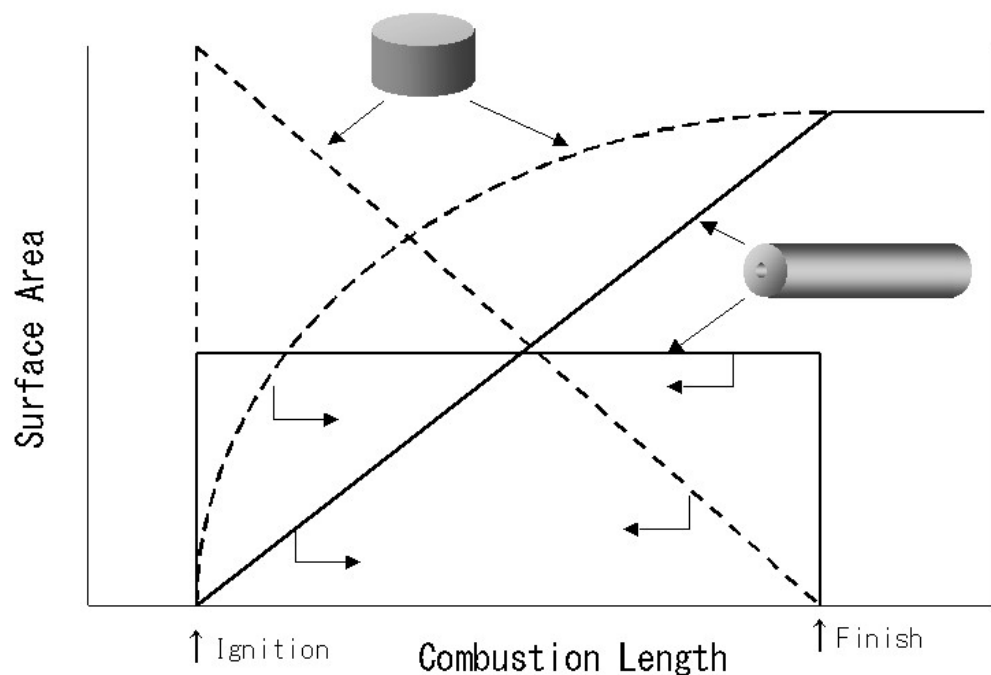
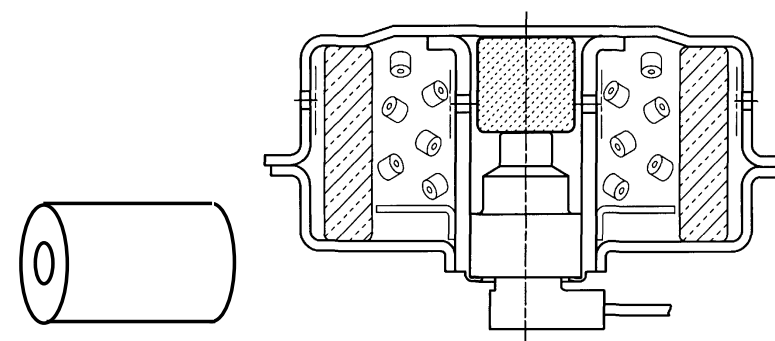
イニシエータ
(点火器)



ディフューザノズル

化学技術賞受賞理由

- 世界で初めてコンポジット系ガス発生剤を**押出成形**で作った
- 円筒状のガス発生剤にすることにより、初期ガス発生速度を抑制し、**加害性を下げ、拘束性能を向上した**
- 燃焼中に発生する微粉の残渣(SrO)を、**Si/Al複合酸化物複塩**を形成させて凝縮しやすくし**フィルターを簡略化**した



最近の活動

講演活動：

- ① 「なぜなぜ分析を用いた組織改革」
- ② 「ISO-9001(IATF16949)を使った収益改善活動」

技術指導：

- ① 中小企業むけ「工程管理と品質管理」指導
- ② 技術アドバイザー（1部上場企業2社＋韓国中小企業1社(終了し探索中)）

その他：

韓日産業・技術協力財団関西拠点

労働安全コンサルタント試験専門科目（化学）セミナー講師

自動車業界の工程管理と品質管理の基礎講座講師

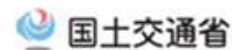
リチウムイオン電池材料、新規プラスチック等のサンプル入手

1. 自己紹介
2. 史上最大のエアバッグ不具合とその原因
3. 不具合発生の際の経緯
4. 再発防止のために
【補足】偽物インフレーターに注意

2. 史上最大のエアバッグの不具合とその原因

「タカタ製エアバッグ搭載車を車検で有効期間を更新しない措置の概要について」
平成29年11月（2017.11）

タカタ製エアバッグ問題の経緯



不具合発生状況

- 2004年以降、硝酸アンモニウムを使用したタカタ製エアバッグのガス発生装置（インフレーター）が異常破裂し、金属片が飛散する不具合が発生。

日本国内での走行中の事故： 8件 うち死者数：0名（負傷者数：2名）

全世界での走行中の事故： 約200件 うち死者数：少なくとも18名

（ 米国12名＜2009年2名、2013年1名、2014年2名、
2015年4名、2016年3名＞
マレーシア5名＜2014年1名、2016年4名＞ ）

- 2008年以降、米国では累計4,200万台以上、全世界では累計8,100万台以上がリコール対象となった。
- 日本国内では、2009年以降自動車メーカー等24社から延べ134件のリコールが実施されており、累計1,883万台が対象。（2017年9月時点）

2022年12月20日(News Week)
ステランティスとNHTSA発表

11月にも死者が2名出た

累計死者は世界で33名、米国で24名

①リコールに応じること、

②未対応のドッジとクライスラーの
運転停止を要請した。

注：ステランティスは、2021年に、FCAとPSA
が合併して発足

FCA：フィアット・クライスラー

PSA：プジョー・シトロエン

注2：旧FCAの未対応車両は、米国で276,000台
あるとのこと

解析に使用した主な資料

Exponent Orbital ATK TK Holdings Takata/(Fraunhofer)

Investigation Inflator Rupture

Takata Inflator Rupture Root Cause Summary Report
Submitted by: Orbital ATK for the Independent Testing Coalition
Submitted to: National Highway Traffic Safety Administration
September 2016

UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION
NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION
1200 New Jersey Avenue SE
Washington, D.C. 20590

TK HOLDINGS INC.
2007 TAKATA DRIVE
AUBURN HILLS, MI 48306 USA
TEL: 248-873-0560
FAX: 248-873-0560

REPORT OF TK HOLDINGS INC. SUBMITTED TO PASADENA OF THE NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION

Technical Report on the Current Status of the Takata Root Cause Evaluation Effort
July 22, 2016

June 30, 2016
Delhiport LL
1095 Avenue
New York

TAKATA CONFIDENTIAL AND PROPRIETARY

米NHTSAが発表(2016/9/23)

Takata/Fraunhofer

解説
エアバッグインフレータの不具合モードの根本原因調査状況

著者一夫: Jochen Neutz*, Hans Ebeling**

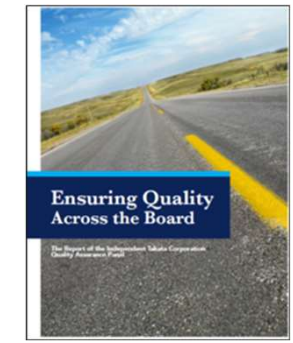
Abstract:
Fraunhofer ICT was approached by TAKATA Corporation to assist in investigations on unintended energetic disassembly of airbag inflators. Fundamental investigations on the AN based pyrotechnic main propellant revealed no problem with typical failure modes of pyrotechnic propellant e.g. phase stabilization of AN or chemical stability. Morphological changes and generation of pores in the core of the propellant grain were identified leading to an increased burn rate by so called porous burning mechanism. Additional investigations focused on characterization of moisture intrusion into the inflator and replication of moisture intrusion by environmental simulation programs used for product validation.

2016年6月30日現在
*Takata株式会社 品質保証 部長
Fraunhofer ICT, Joseph von Fraunhoferstr. 1
D-76327 Plauen, Karlsruhe, Germany
TEL: +49(0)3741-4600014
E-mail: Jochen.Neutz@fraunhofer-ict.de

**Scientific employee of ICT
Fraunhofer ICT, Joseph von Fraunhoferstr. 1
D-76327 Plauen, Karlsruhe, Germany
TEL: +49(0)3741-4600014
E-mail: Hans.Ebeling@fraunhofer-ict.de

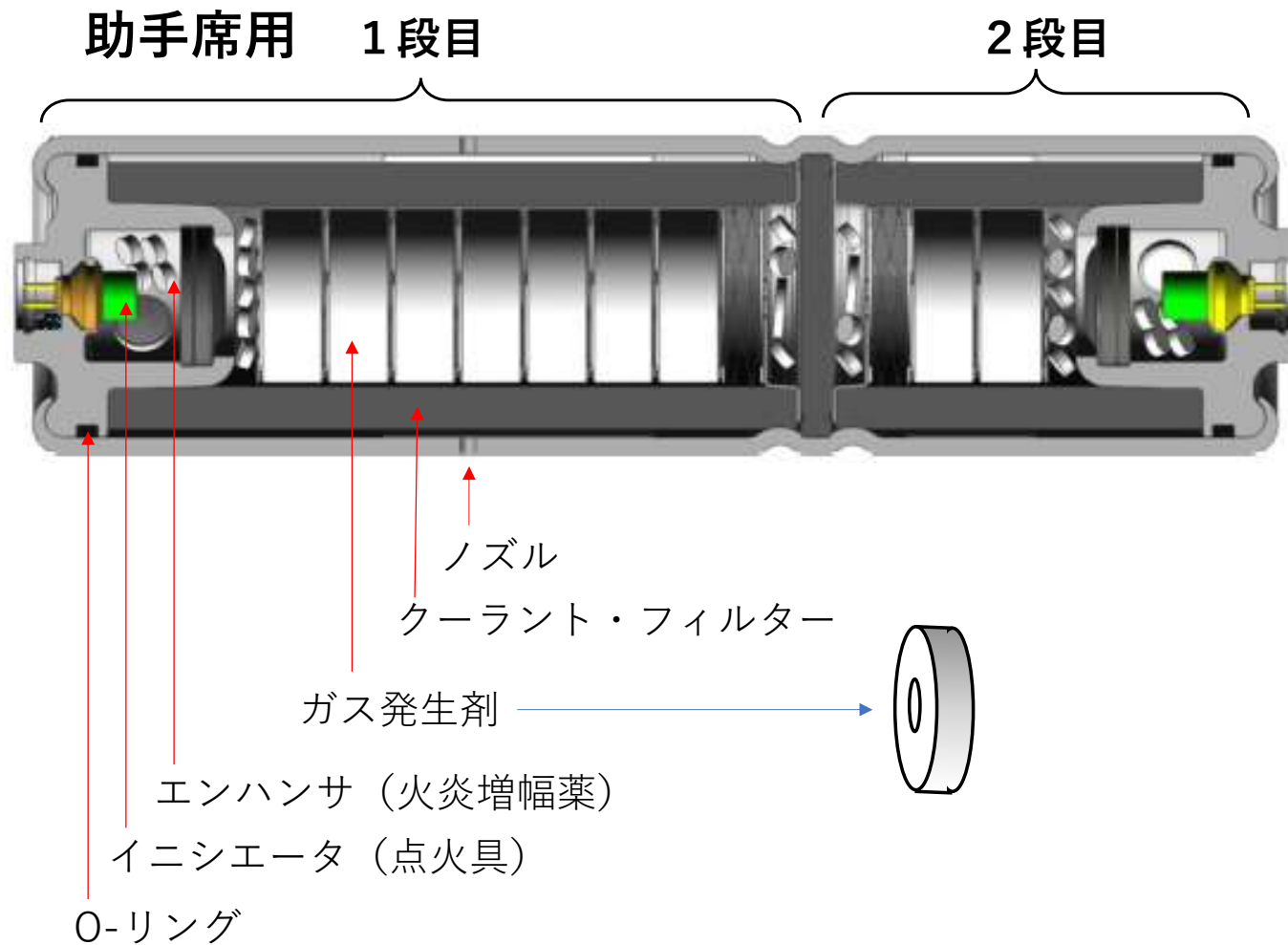
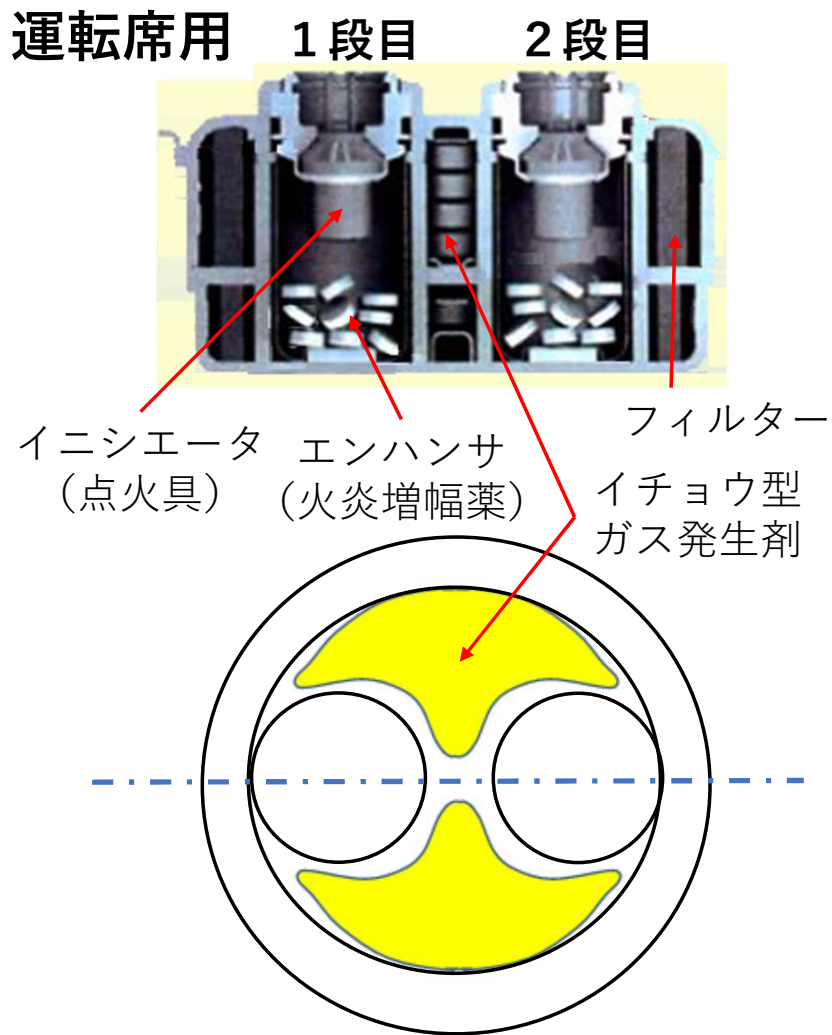
EXPLOSION

吉村一夫, Jochen Neutz, Hans Ebeling, EXPLOSION, 26, 88-93 (2016)



第三者パネル報告書

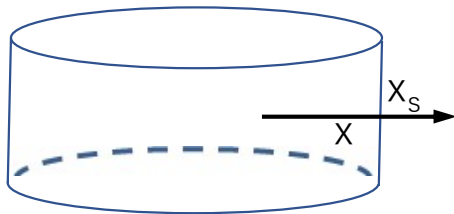
対象インフレーター



ガス発生剤の燃焼機構

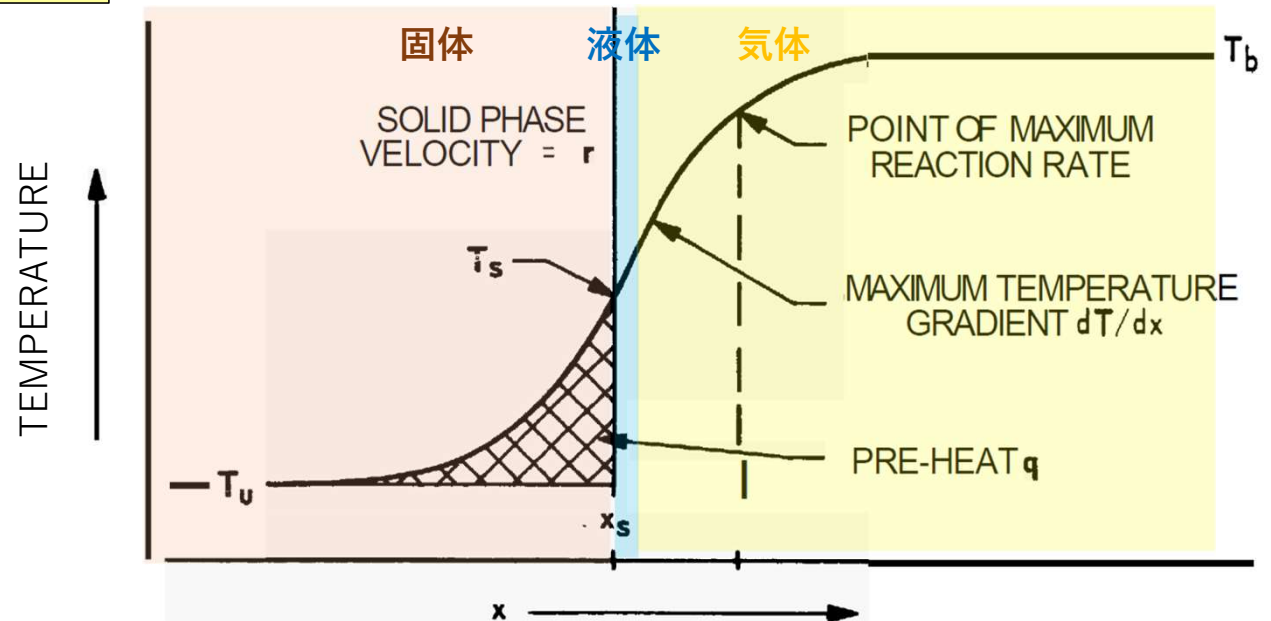
- ・ガス発生剤は表面から燃焼する
- ・ガス発生速度は、
 - ①表面積が広く、
 - ②温度・圧力が高いと速い

ガス発生剤の錠剤



- x_s : 表面
- T_s : 表面温度
- T_u : ガス発生剤内部の温度
- T_b : 燃焼完了ガスの温度

ガス発生速度 \propto 燃焼表面積 $A \times$ 線燃焼速度 $r(t)$
 線燃焼速度 $r(t) = a \times P^n$



燃焼中のガス発生剤の温度分布

T社ガス発生剤

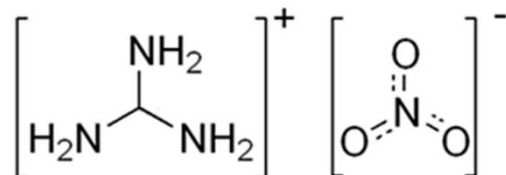
2000年から**相安定化硝酸アンモニウム (PSAN) 系**ガス発生剤 (2004系) を採用した。
 本品は、**ガス化効率上昇、毒性低下、火災危険性を減少させた**画期的なガス発生剤である。

	組成	ガス化率	毒性	燃焼性
アジ化ナトリウム系	NaN ₃ + 酸化剤 (酸化銅、酸化鉄など)	40% ガス発生剤が多く必要 N aが発生	毒物 経口rat LD50 =45 mg/kg	易燃性 火災・爆発の危険性あり
3110系 1994年から	テトラゾール + 硝酸ストロンチウム	77%	ほぼ無毒	易燃性 同上
PSAN系 2004系 2000年から	燃料：BHT 酸化剤：硝酸アンモニウム、硝酸カリウム、 硝酸ストロンチウム、 添加剤：クレイ	92% 実質無残渣 スモークレス インフレーター	ほぼ無毒	難燃性 常圧では着火しない

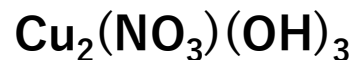
https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/documents/takata_report_internal_investigation.pdf

一般的なガス発生剤の組成

燃料：グアニジン硝酸塩
(通称：GuNi)



酸化剤：塩基性硝酸銅



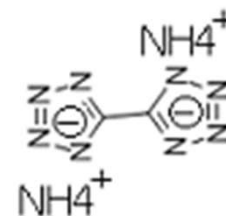
特開平11-343192 (TRW) 他

硝酸アンモニウム系ガス発生剤

(特表2001-504432 オートモーティブ・システム・ラボラトリーズ)

燃料

BHT (5, 5'-bis-1 H-tetrazole di-ammonium salt)



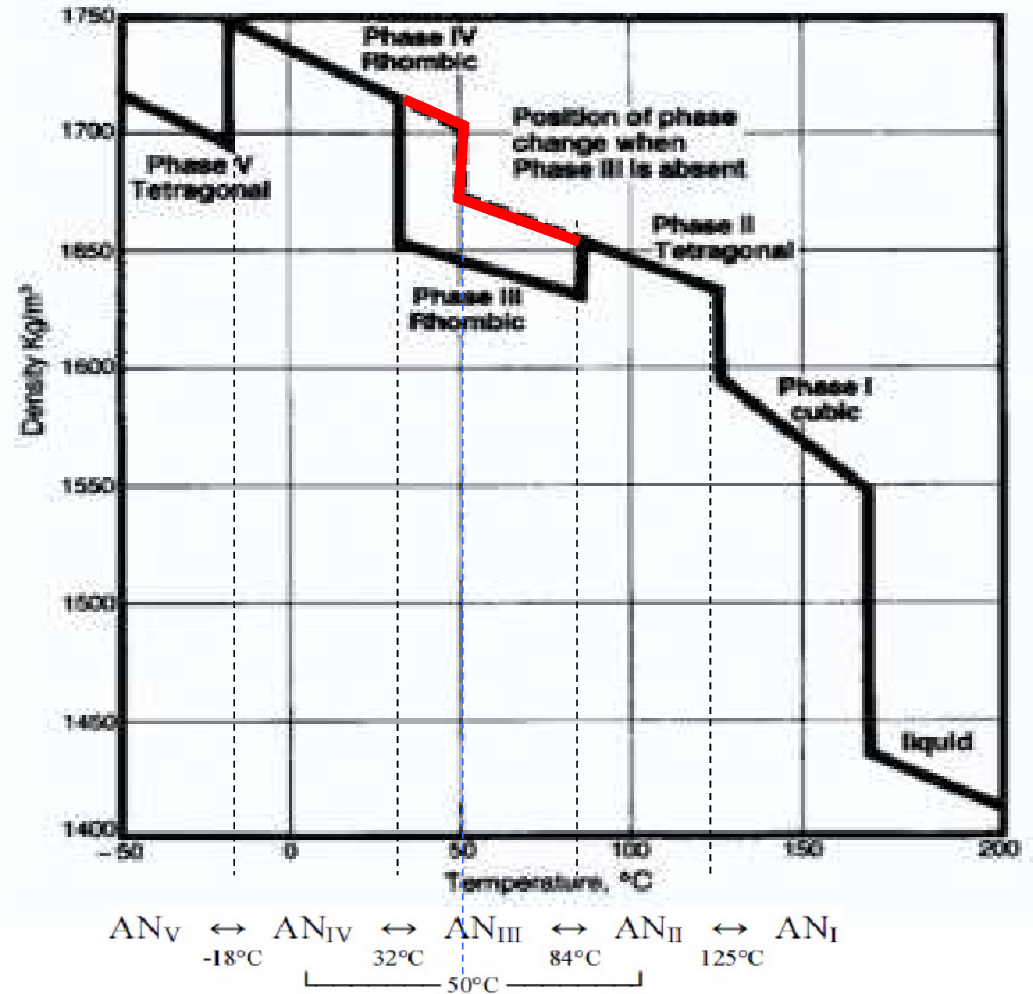
酸化剤

相安定化硝安：(硝酸アンモニウム (AN) + 硝酸カリウム (KNO3))
硝酸ストロンチウム

相安定化硝酸アンモニウム (PSAN)とは

固体の硝酸アンモニウムは、5つの結晶形を持ち、転移温度における比重の変化(体積変化)が大きい。特に、32°CのAN_{IV}⇒AN_{III}の転移は、体積変化が大きく、プレス成形したガス発生剤が変形したり、最悪の場合は粉化する原因となる。

相転移を抑制したものを、相安定化硝酸アンモニウムという。右図の破線は、カリウム添加によって、AN_{III}を作らず、50°CでAN_{IV}⇒AN_{II}転移に調製した例を示す。



オートモーティブシステムズの相安定化技術

特表2001-504432

例 1 6

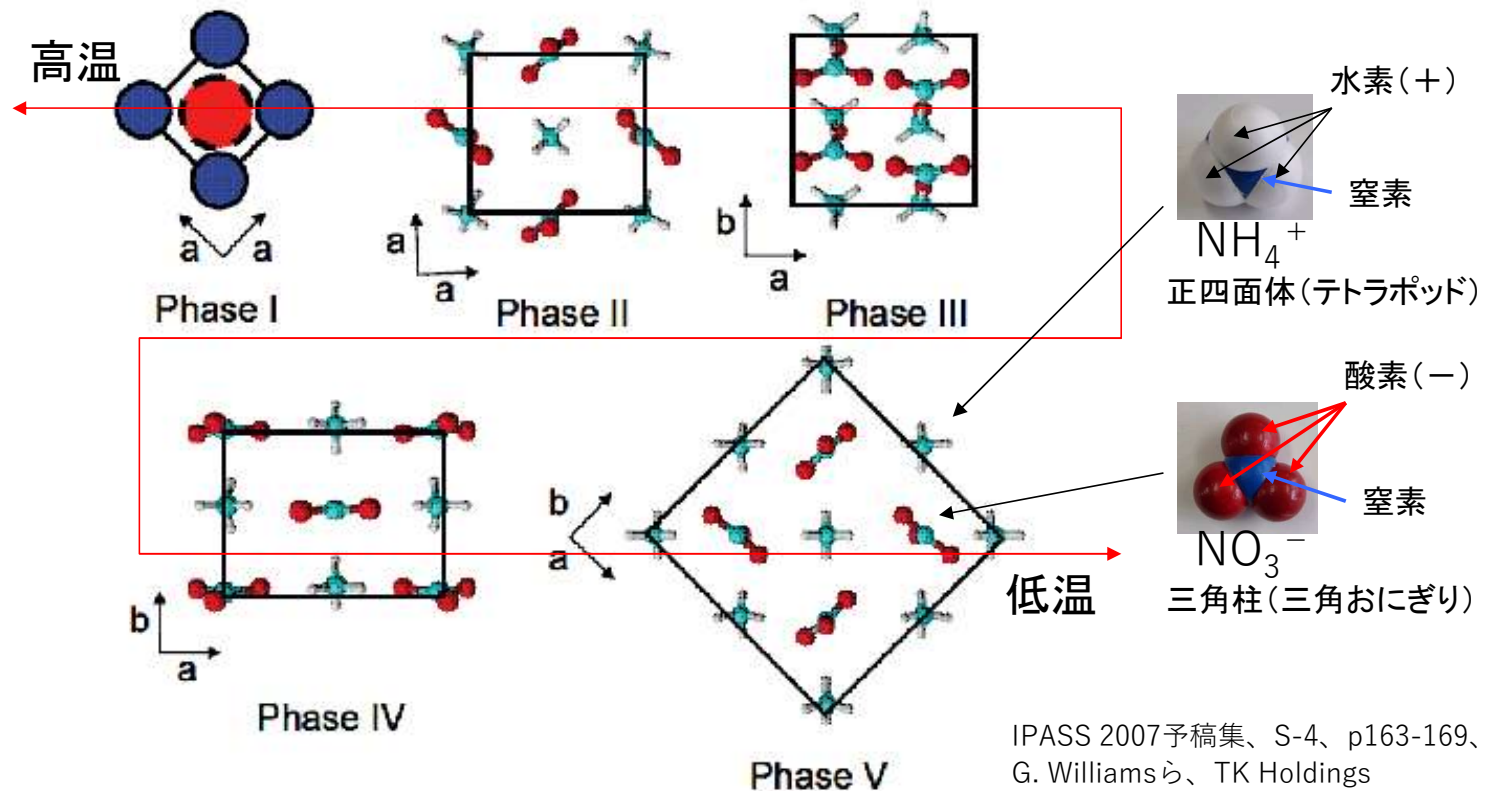
硝酸アンモニウム (AN) 85重量%および硝酸カリウム (KN) 15重量%からなる相安定化硝酸アンモニウム (PSAN) を以下のように製造した。乾燥AN 2125gおよび乾燥KN 375gを熱せられたジャケットの2重遊星状ミキサーに加えた。蒸留水を、全てのANとKNが溶け、溶液温度が66~70°Cになるまで混合しながら加えた。混合を、乾燥した白色粉末が生成されるまで大気圧で続けた。この製造物がPSANであった。PSANをミキサーから取りだし、薄い層に延ばし、80°Cで残留水分を除くために乾燥した。

例 1 7

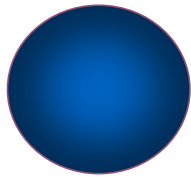
例16で製造されたPSANと純粋なANとを、DSC中0°Cから200°Cで試験した。純粋なANは、固体-固体相変化に対応して約57°Cおよび約133°Cで吸熱、並びに約170°Cで融点吸熱を示した。PSANは、約118°Cで固体-固体相転移に対応する吸熱および約160°CでPSANの融点に対応する吸熱を示した。純粋なANとPSANは、直径12mm、厚さ12mmのスラグにプレスされ、-40°Cから140°Cの温度範囲で体膨張計測器で容積膨張を測定した。純粋なANは、約-34°Cで収縮、約44°Cで膨張、および90°Cで収縮および約130°Cで膨張した。PSANは、-40°Cから107°Cで加熱したとき、容積変化がなかった。それは約118°Cで始まる容積膨張を起こした。

タカタのPSANは、-40°Cから107°Cの範囲で相変化を起こさない。

硝酸アンモニウム各相の結晶形



1. 大きなイオン (NH_4^+ と NO_3^-) の塩なので、距離が長く結合が弱い
 2. 硝酸イオンの酸素とアンモニウムイオンの水素が、水素結合する
- ⇒ 結合の組み換えが容易に起こり、各温度で最適な結晶が異なる



K⁺
カリウムイオン
(球体)1.33Å



NH₄⁺
アンモニウムイオン
(正四面体)1.48Å



NO₃⁻
硝酸イオン
(平面)

カリウムイオン (球体) 1.33Åが、硝酸アンモニウムの結晶構造に入り込むことによって、格子間距離が小さくなること、水素原子を持たないため水素結合がなくなることなどから、イオン結晶の格子結合が強固になって、相転移が起こらなくなると考えられている。

どの程度添加すると効果があるかは実験で検証している。

イオン交換による相不安定化の可能性

1. 回収品は初期品とDSC上差が無い
2. 回収品も 30°C~105°CまでDSCピークが無い
XRDでも相変化が見られない

⇒ 相安定化は機能している

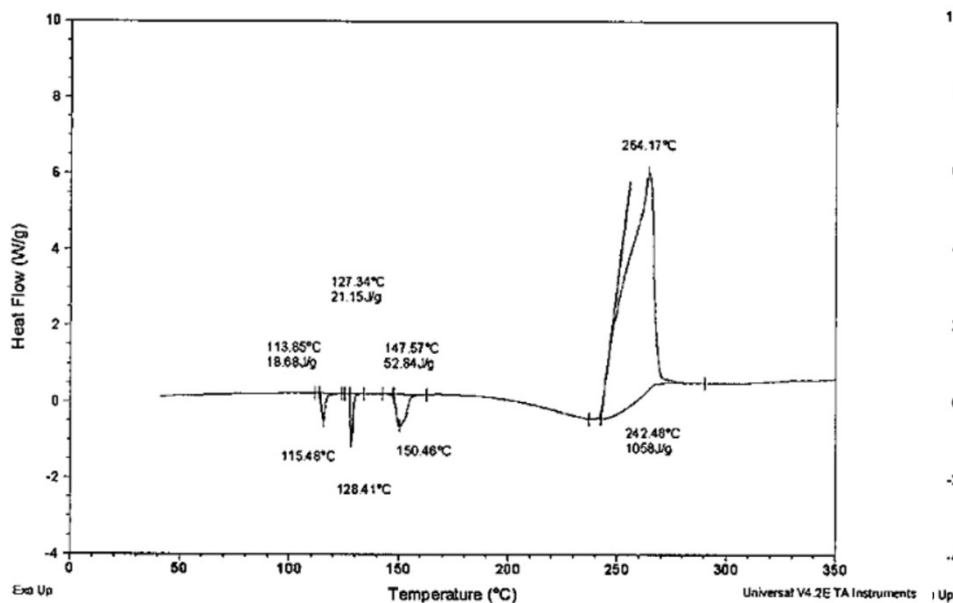
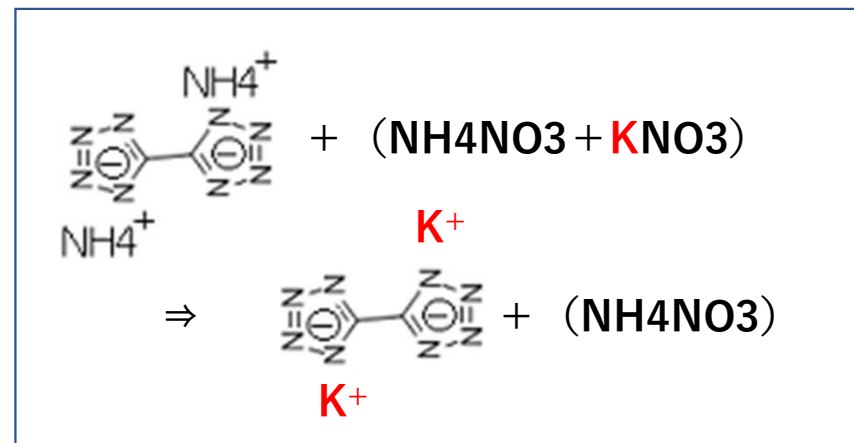


図2 初期品のガス発生剤のDSC

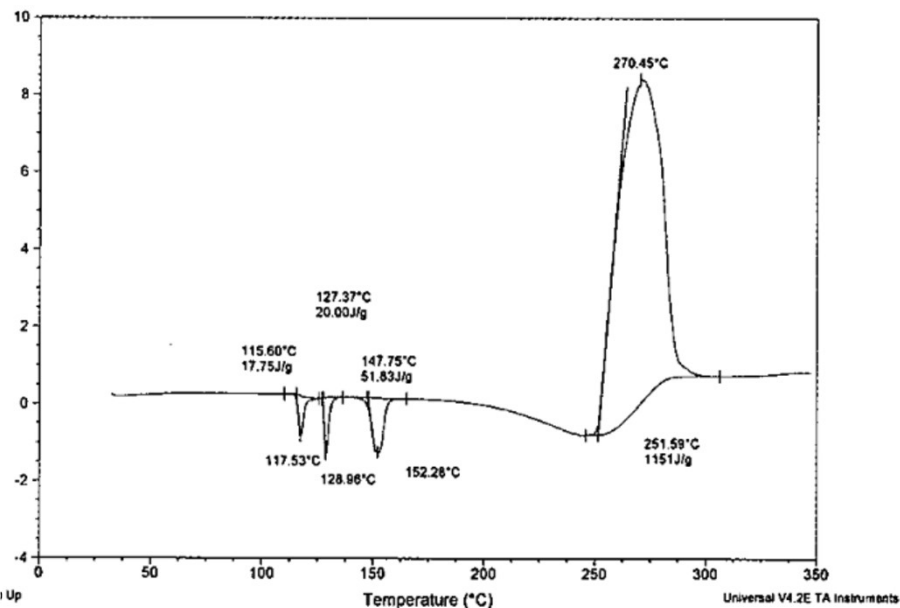
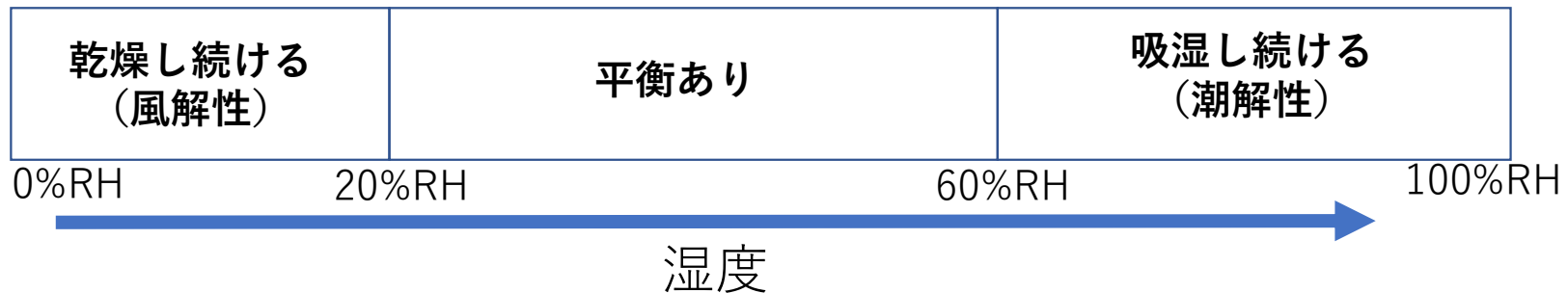


図3 市場回収品ガス発生剤DSC

硝酸アンモニウムのもうひとつの重大な問題点

硝酸アンモニウムの吸湿特性



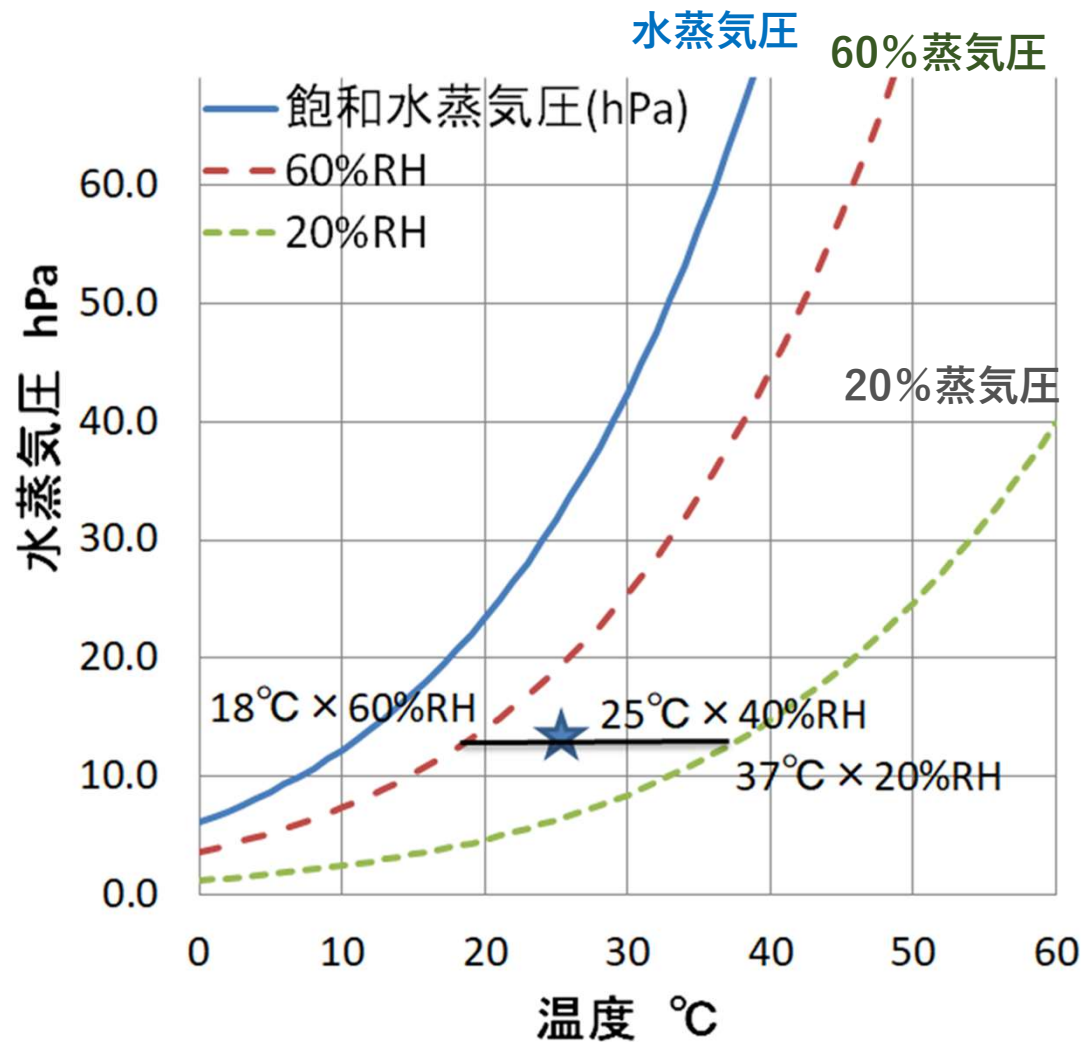
潮解とは

物質が空気中の水分を吸収して溶けていくこと。

風解とは

水和物結晶（結晶の中に水を含んでいる）の水分が蒸発して無水物になっていくこと。

硝酸アンモニウムの吸湿平衡



25°C40%の空気が温度変化した場合、

- ① 18°Cになると60%RHを超える
- ② 37°Cになると20%RHを下回る

内部のガス発生剤は

7°C下がると60%RHになり、潮解し始める
12°C上がると20%RHになり、乾燥が始まる

回収インフレーター解析：ガス発生剤中水分が8%になるまでの年数

Exponent

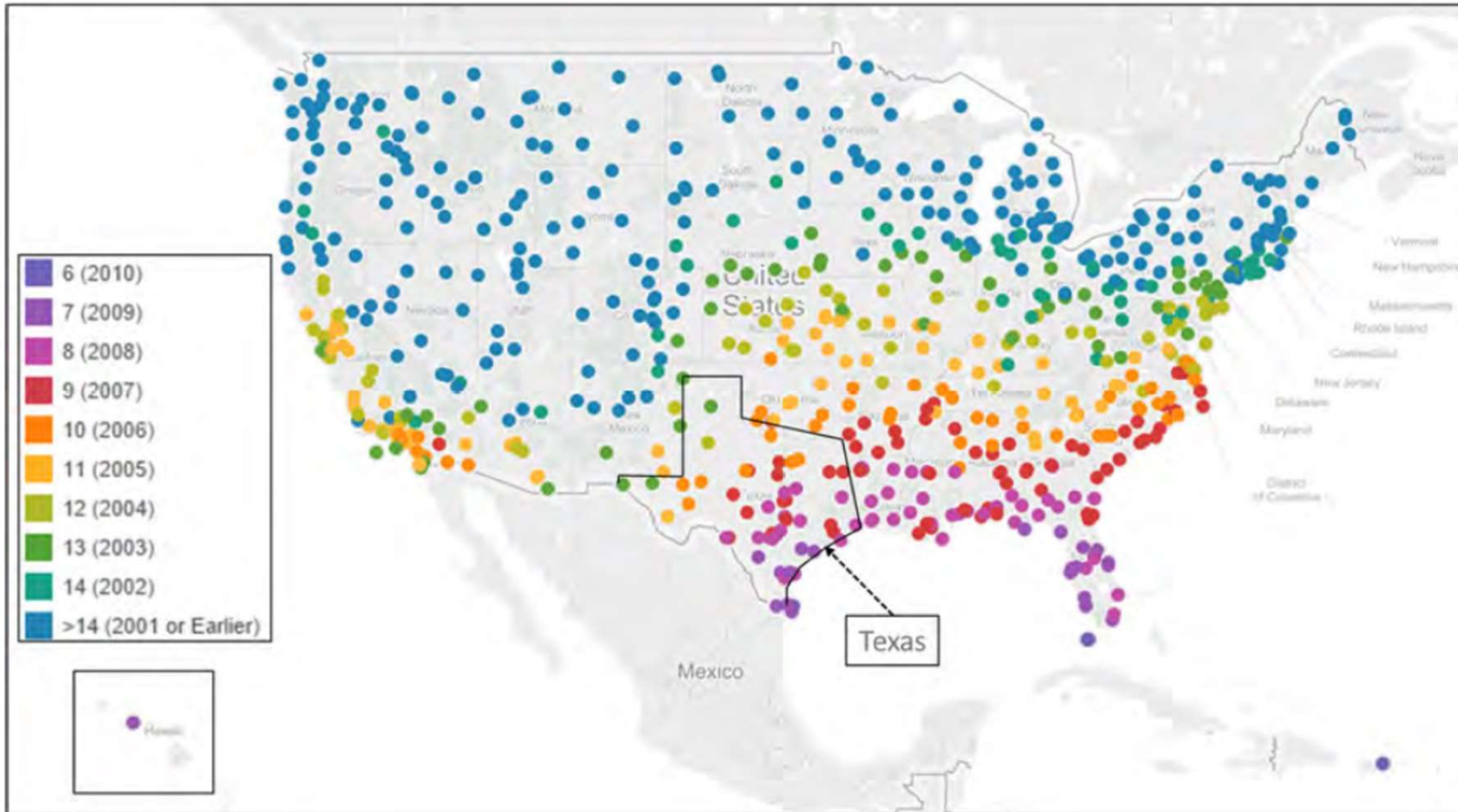


Figure 20. Map of number of years to get to 8% moisture flux in 2004 propellant (and vehicle model years reaching 8% moisture flux on January 1, 2016). Texas is outlined to illustrate the variations within a given state.

図 20 は、PSPI-L インフレーターが 8% の水分に達するまでにかかる年数を示している。数値が小さいほど、ガス発生剤の水分蓄積が速い（劣化速度が大きい）ことを示している。2016 年 1 月 1 日に水分が 8% に達する車両のモデル年が括弧内に示されている。8% 水分に達する最短時間は約 6 年で、これはプエルトリコのサンファンで発生する。一般に、劣化が最も進む地域は、プエルトリコ、フロリダ南部、メキシコ湾周辺の沿岸地域など、米国南東部の高温多湿な地域である。劣化が最も少ない地域は、北部とロッキー山脈周辺の地域である。

水分侵入の可能性のあるルート

Orbital ATK

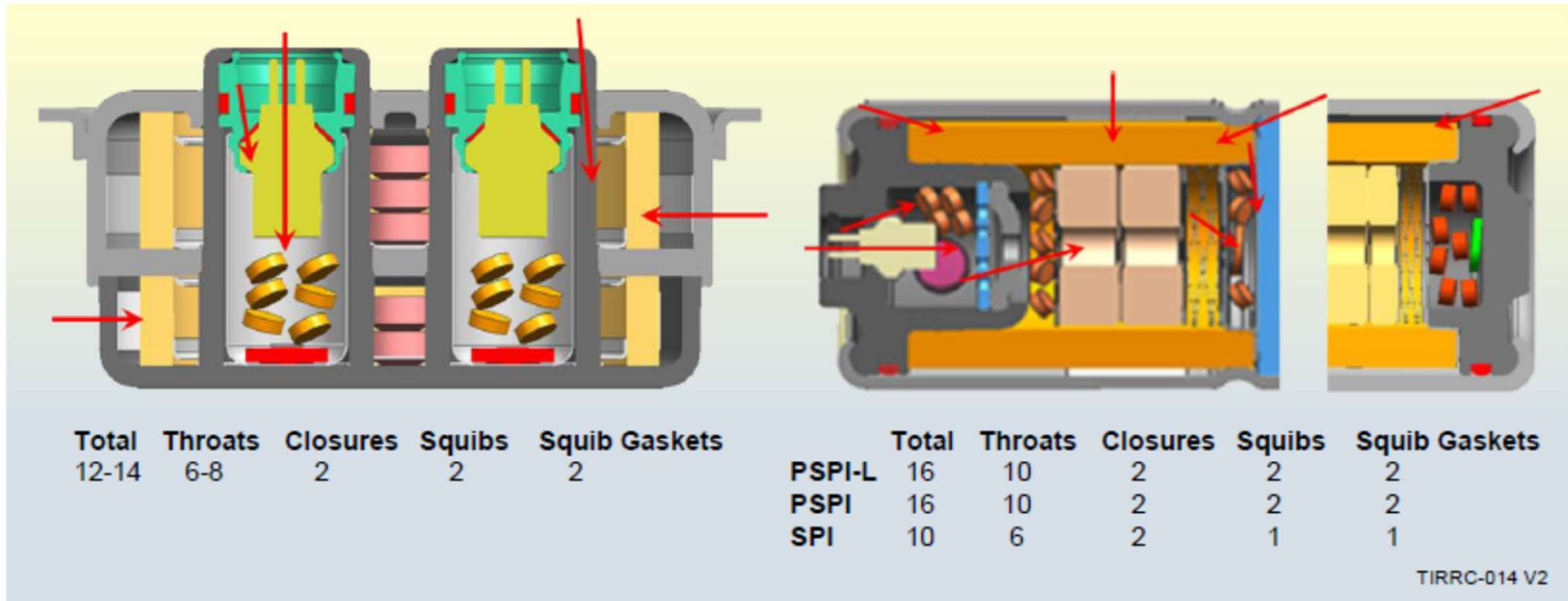
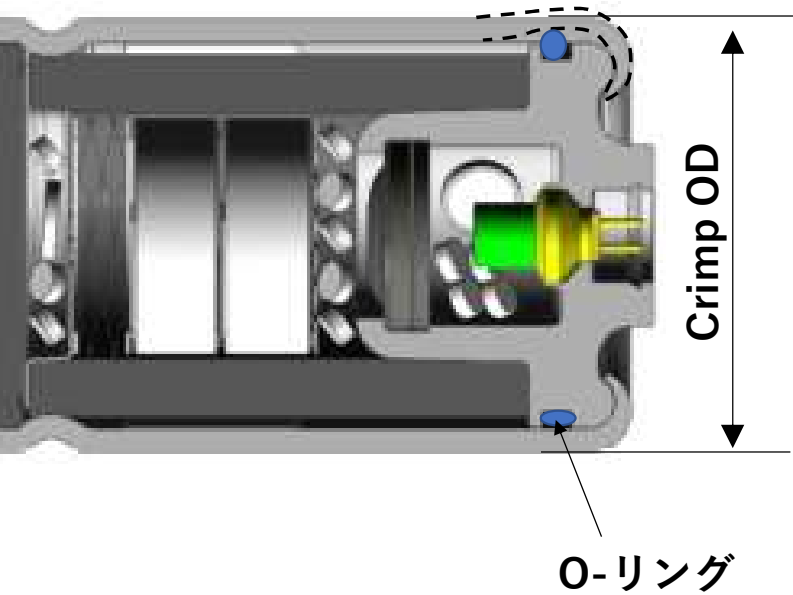


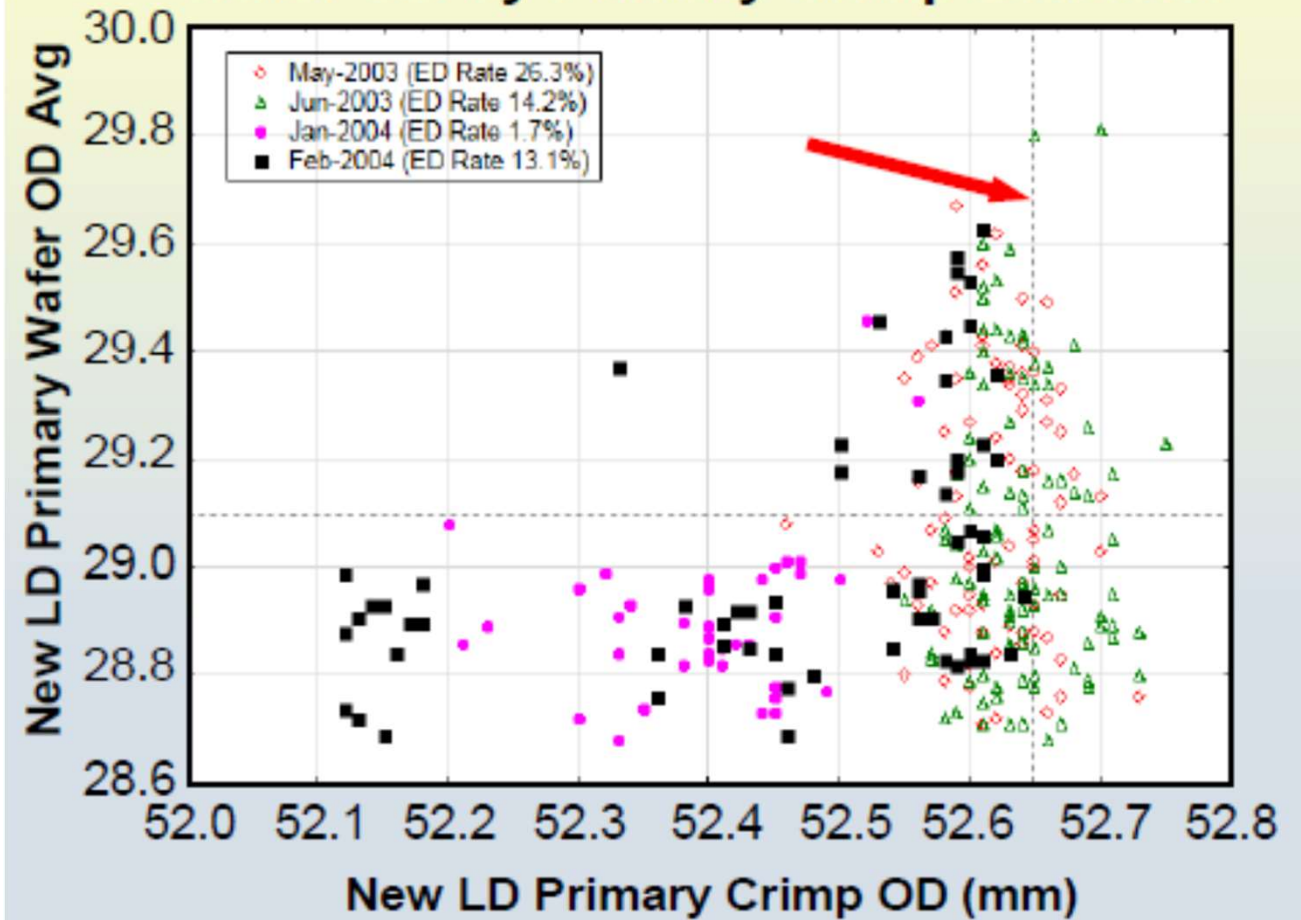
Figure 13. Potential Leak Paths in Takata Inflators.

Several different seals are present in both passenger and driver inflators (marked by red arrows). While a great deal of emphasis has been placed on the passenger crimp and O-ring, every seal is a potential path for moisture to enter the inflator and must be considered in any valid moisture transport model.

カシメ不良による、O-リング圧縮代喪失



PSPI-L Florida Corolla Primary Wafer OD by Primary Crimp Diameter



Exponent

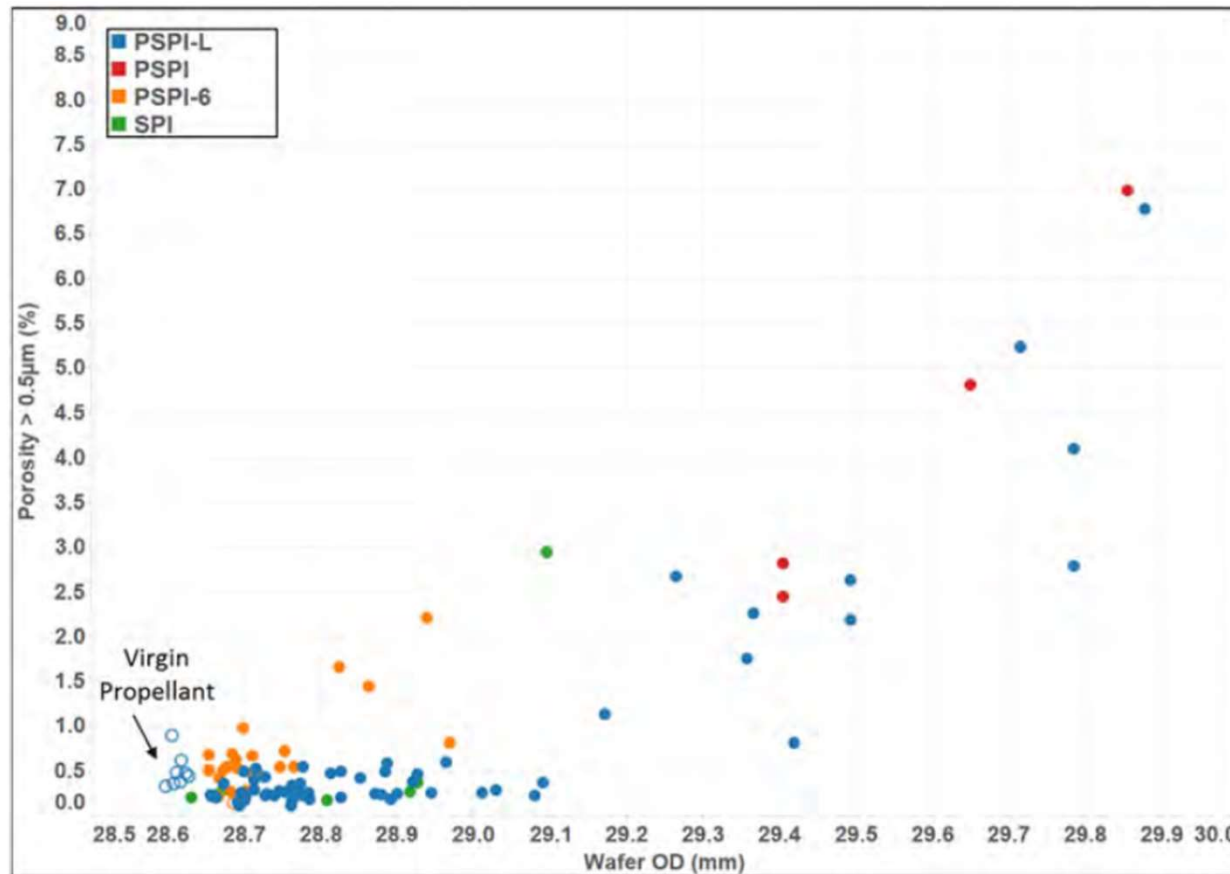
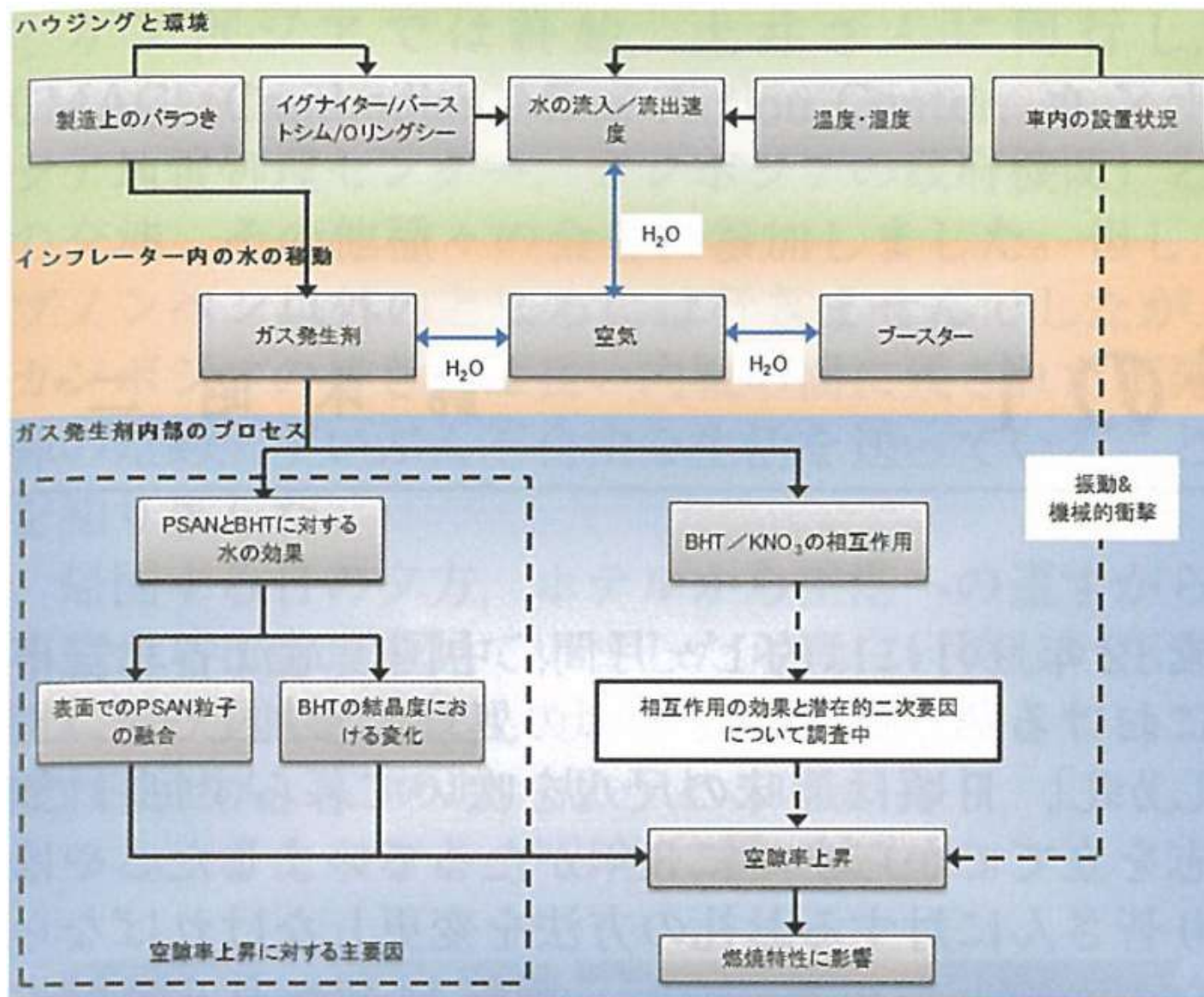


図9は、ガス発生剤の直径が大きいと、 $0.5\mu\text{m}$ 以上の細孔からなる空隙率が高いことをしめしている。横軸は、ガス発生剤外径、縦軸は空隙率を示している。空隙率は水銀圧入法で測定した。

ガス発生剤の直径が膨らんでいると、空隙率が大きくなっていることを示している。

Figure 9. MIP porosity above $0.5\mu\text{m}$ pore diameter versus OD for propellant wafers from different inflator designs. (The nominal OD for virgin wafers is 28.6 mm, as denoted by the hollow circles.)



「エアバッグインフレータの不具合モードの根本原因調査状況」 EXPLOSION, Vol.26, No.2, 88-93, 2016

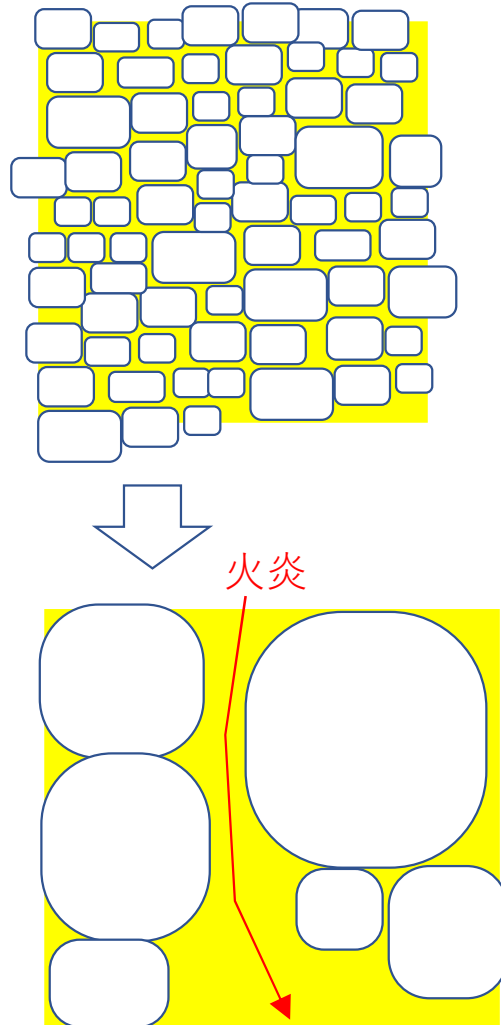
不具合原因

水分による溶解と再結晶をくりかえすと粒子径が大きくなる
市場回収品は、未使用品よりも、

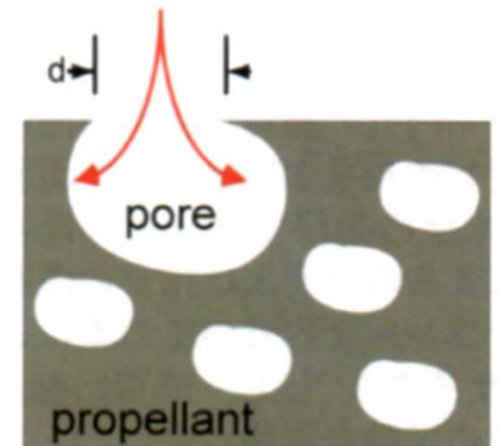
- ① 粒子が大きくなっている
- ② 粒子間の隙間が拡大している

水分による溶解と乾燥を繰り返したため、粒子径が大きくなり、
粒子間に隙間が発生した

隙間に火炎が入ると
「ポラス・バーニング」が起こり、
ガス発生剤が割れて
表面積が急増し、
異常内圧が発生して
インフレーターが破裂する。



Flame entering pore



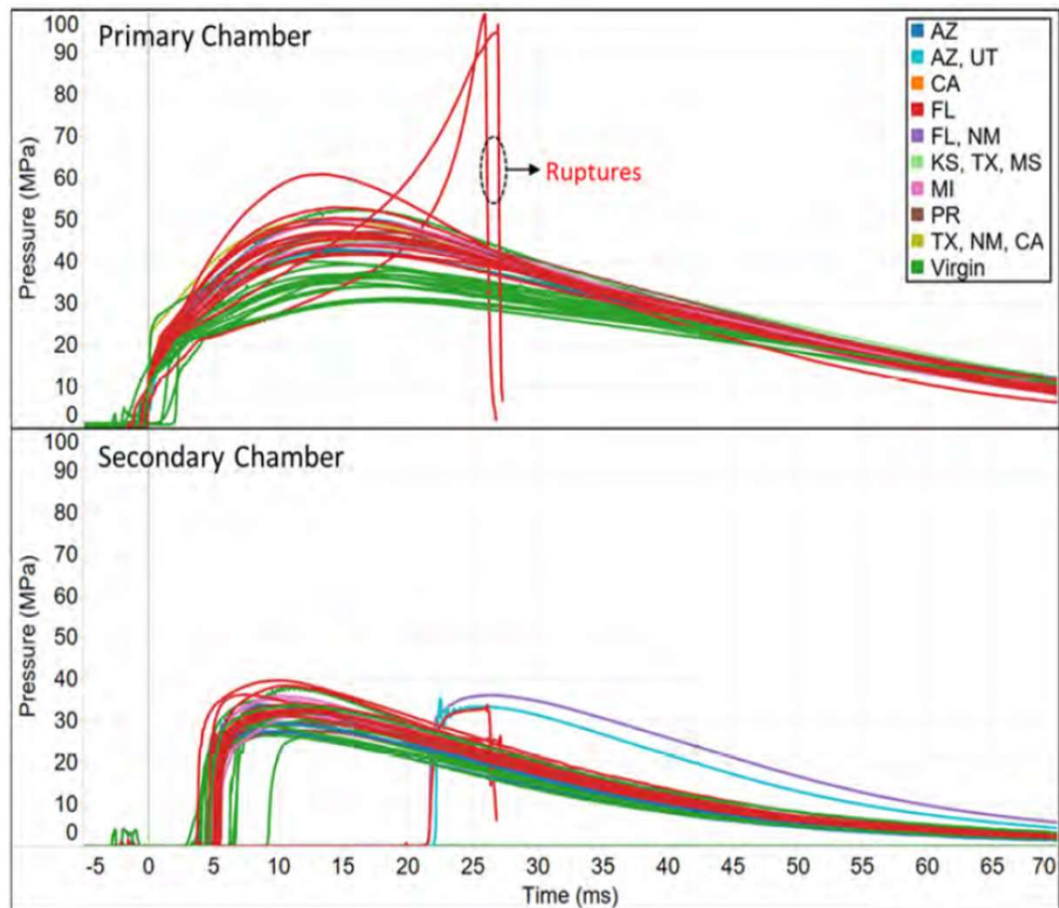


図11. 回収インフレータの作動内圧測定結果
フロリダの2個が破裂した (いずれも1stチャンバー)

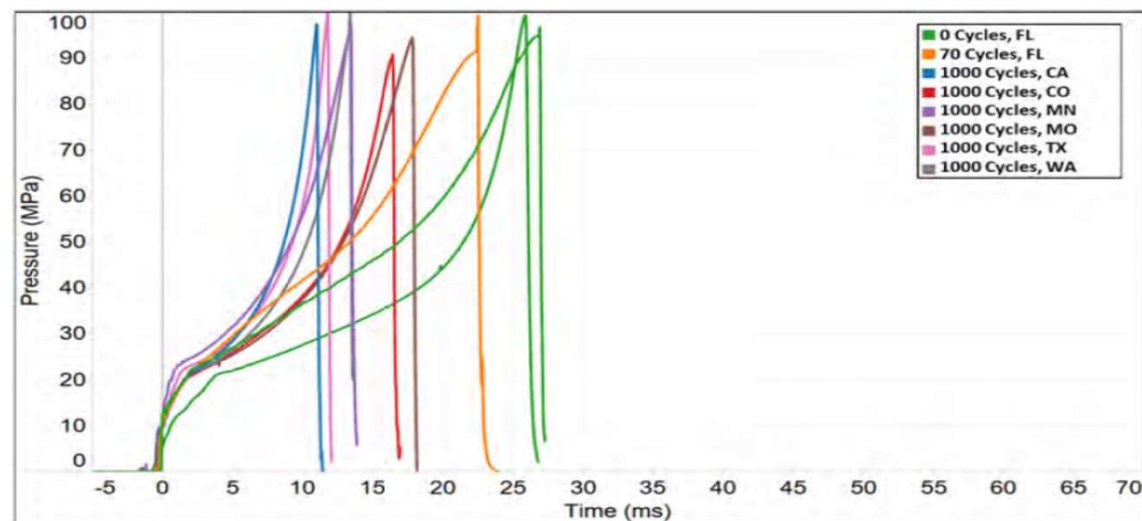


図12. 回収したインフレータを、実験室で2~80°C/4時間の温度サイクルをかけた後の作動内圧試験結果。すべてのインフレータが破裂した。

ガス発生剤劣化によって空隙率が上がり、ガス発生剤内部の燃焼（ポーラスバーニング）によって、ガス発生剤が割れ、急激な表面積拡大と燃焼速度増加、内圧急上昇によって、インフレータの破裂が起こったと考えられる。

1. 自己紹介
 2. エアバッグ不具合とその原因
 3. 不具合発生の際
 4. 再発防止のために
- 【補足】偽物インフレーターに注意

3. 不具合発生の際

【開発～量産開始】

1996年ごろ相安定化硝酸アンモニウム（PSAN）ガス発生剤開発開始

（特表2001-504432の優先日（1996.11.8）から推定）

1999年10月と2000年1月に**自動車会社の評価試験で破裂**が発生した。

溶接不良と組付不良が原因と報告した。

1999年末ごろ、ガス発生剤（プレス成形品）2通りの形状を試験し、2000年2月に自動車メーカーの指示で成形形状を蝙蝠翼型に決定した。蝙蝠翼型形状を選定したため圧縮時間が長くなり成形機台数が不足し、インターロックの無い試験設備を量産に用いた。

3～6月のPV試験中に、**3個以上破裂、性能の規格外れの問題**が発生したが、**不具合データを削除したPV報告書**を自動車会社に提出した

（米人技術者2名がそれぞれ、**PV報告書は虚偽だと内部告発**したが会社は動かなかった。）

2000年9月、当該インフレーターが搭載された車両の販売開始

2000年10月、原料BHTに未粉碎品を使えば、破裂が発生しなかった。

11月から△PV試験を行い2001年3月に合格。BHT未粉碎品に変更して解決したと考えた。

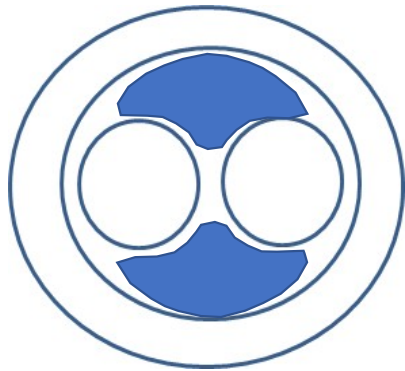
TK Holdings



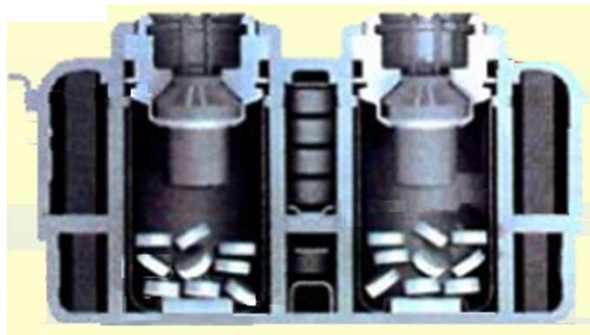
PSANガス発生剤形状の変更

2000年1月に、自動車会社が、**フカヒレ形状と蝙蝠翼形状**のガス発生剤の両方のPSDIインフレーターで**スレッド試験**を行い、フカヒレ形状のものは不合格となった。

2000年2月、**自動車会社は**タカタに**蝙蝠翼型形状を使うことを指示**した。



(注：蝙蝠翼型形は、成形圧保持時間が長く必要で、生産性が落ち、成形機が不足したので、圧縮力モニターや自動排出機構のない、**試作用成形機を量産に転用した。**)



フカヒレ形状



蝙蝠翼型形状

3. 不具合発生の際緯

【市場不具合の発生】

- 2003 スイスで**破裂事故**が発生したが、ガス発生剤の**過剰充填**と判断した。
- 2004 5月に市場で破裂が発生したが、報告が写真のみだったため、**例外的異常**と判断した。
- 2007～2008 **4件の破裂事故**が発生し**初めてリコール**した（**原料リサイクルが原因**）
- 2009 米国オクラホマで最初の**死者**が発生
- 2012～2013 再発が続き**プレス機自動排出不良**と**運転停止時の管理不良**が原因として**リコール**
成形圧不足and/or運転停止時の吸湿 = 「**α事象**」
- 2013 8月以降に破裂事故が連続して発生
⇒ 「α事象」以外のものを「**β事象**」と呼んで原因調査をした

3. 不具合発生の際

【原因説明と対策】

- 2014 11月に高温高湿地域での事故多発⇒**水分が原因**である可能性を発表
- 2015 5月に**乾燥剤を同封してない**特定品種の**インフレータのリコール**を発表
11月に、米国内のPSANインフレータの**新規契約を中止**、乾燥剤のないPSANインフレータの米国内**販売を縮小**することをNHTSAと合意
- 2016 3月にタカタ とFraunhoferが、NHTSA と自動車メーカーに**高温高湿地域での吸湿・温度変化が原因**と考えられる検討結果を報告
5月、NHTSAはPSANインフレータ破裂の原因は、「時間、温度サイクルおよび環境曝露の関数である可能性が高い」と結論づけ、**乾燥剤を使用していないすべてのPSANインフレータをリコールする**計画を立案開始した

1. 自己紹介
 2. エアバッグ不具合とその原因
 3. 不具合発生の際の経緯
 4. 再発防止のために
- 【補足】 偽物インフレーターに注意

4. 再発防止のために

第三者パネル報告書

- ・自動車会社規格でなく **自社規格** を構築すべき
- ・デザインレビューの **条件付き承認を低減** する必要がある（20%以下に）
- ・商品の **寿命監視（市場でのモニター）** をすべき
- ・**管理層における品質重視の文化** を構築すべき

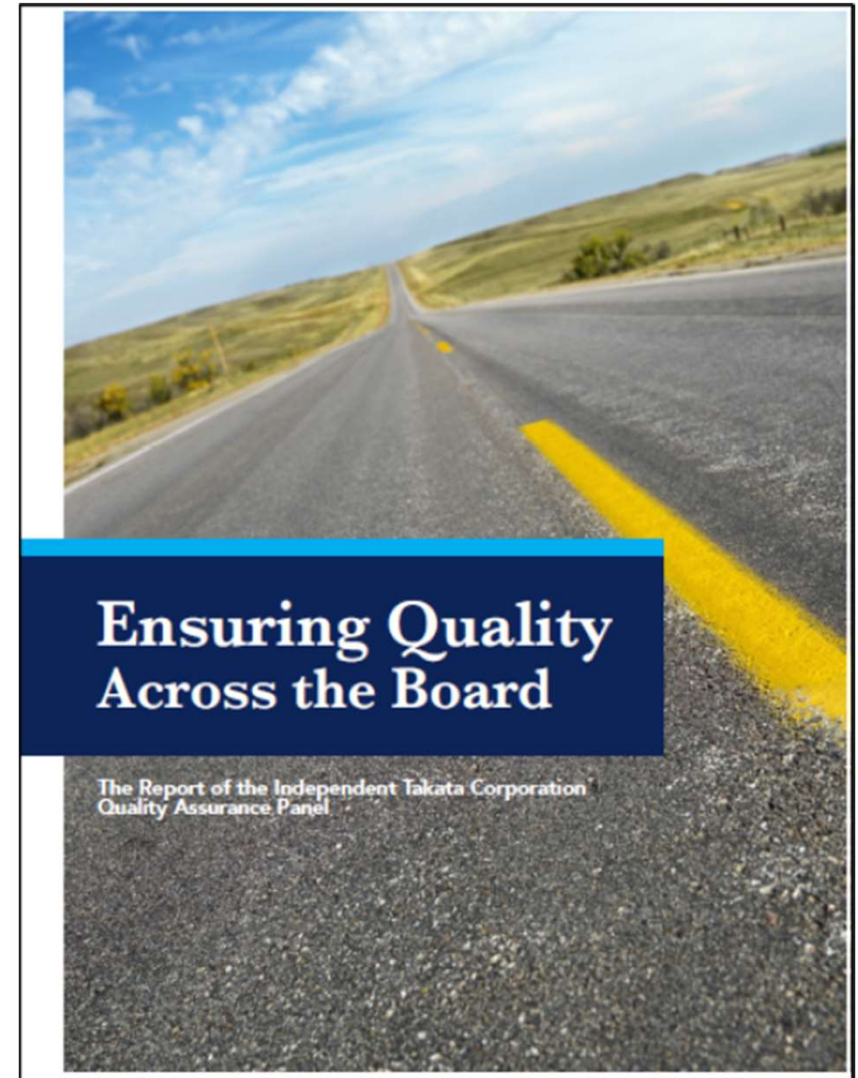
以上を達成するための **組織見直し** が必要

Panel Chairman :

Samuel Skinner, the former White House chief of staff and secretary of U.S. Department of Transportation

Panel Members :

Marion Blakey, President and CEO, Rolls-Royce North America
Nelda Connors, Founder, Chairwoman, and CEO, Pine Grove Holdings, LLC
John Landgraf, Executive Vice President, Abbott Laboratories,
Dr. Julio M. Ottino, Applied Science, Northwestern University
Dr. Jeffrey Runge, President of Biologue, Inc.
John Snow, Chairman, Cerberus Capital Management LP



講師の考える問題点

① 硝酸アンモニウムの吸湿性を軽視した

FMEAで第一に挙げるべき故障モードなのに、影響検討や対策の深堀りが見えない
PSAN採用は非常に大きなジャンプであるから、準備・検討期間をもっととるべきだった

⇒ 設計FMEAと工程FMEAを、有効に活用すべき

② 破裂原因が分かるまで10年以上かかった。

開発中から事象を認識していたが、原因が分かったのは2016年だった。

この間、不具合原因が次々と変わり、最終的に全製品がリコールになった。

⇒ 現象論(実験計画法?)で原因を決めず、論理的整合性を検証すべきだった

③ 内部告発が活かされなかった。

米国技術者の内部告発を適正に処理するシステムが無かった(?)

⇒ 現在はこの会社も制度は整備しているが...

④ 不具合発生時に対応できないスケジュールだった。

⇒ 1年前に開発完了した技術しか使わない

車両開発スケジュール

2001Model Year（2000年9月発売）の車両に搭載するためには、

- 8月：車両量産開始
- 7月：エアバッグ（6月末にはインフレーター）量産開始
- 6月：PV試験終了してなければいけない

2000年当時は、このようなギリギリスケジュールが存在した。

PV試験で不合格になると、代替品を用意する時間がなく、車両発売時期が年単位で遅れる。

車両発売を遅らせることは、とんでもない事であり、今後の商売に対して、ペナルティが課せられる。

⇒ 何としても量産を遅らせられないという強迫観念があった

	2000年								
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月
車両発売									★
車両量産								★	—————
エアバッグ量産							★	—————	—————
インフレーター量産						★	—————	—————	—————
インフレーターPV試験			—————			6/23★PV試験報告書提出			
			(3個以上PV試験中に破裂した)						

1. 自己紹介
 2. エアバッグ不具合とその原因
 3. 不具合発生の際の経緯
 4. 再発防止のために
- 【補足】 偽物インフレーターに注意

【補足】 偽物インフレーターに注意

～エアバッグの交換は正規代理店で～

2010年ごろ、姫路の中古車店は「正規ルートは高いのでネットオークションで買う」と言っていた。
2012年、米国では偽物が出回りNHTSAが警告していた。
講師も、現役時に米国税関が入手した品物の鑑定依頼を2回受けた記憶がある。

2015年ごろから、タカタ製インフレーター事故の影響かインフレーターを外して出品するようになった。

【問題点】

1. インフレーターとバッグのトレーサビリティが無くなる
2. 車型に最適な出力でなくなり危険
3. 偽物インフレーターが混入する可能性がある。

ヤフオクの出品例



最近の出品例



【補足】 偽物インフレーターに注意

～エアバッグの交換は正規代理店で～

<https://www.iprcenter.gov/video-repository/nhtsa-airbag-counterfeit.mp4/view>

ご清聴ありがとうございました