

---

# 炭化水素の自己着火特性と 燃料のHCCIインデックスの考え方

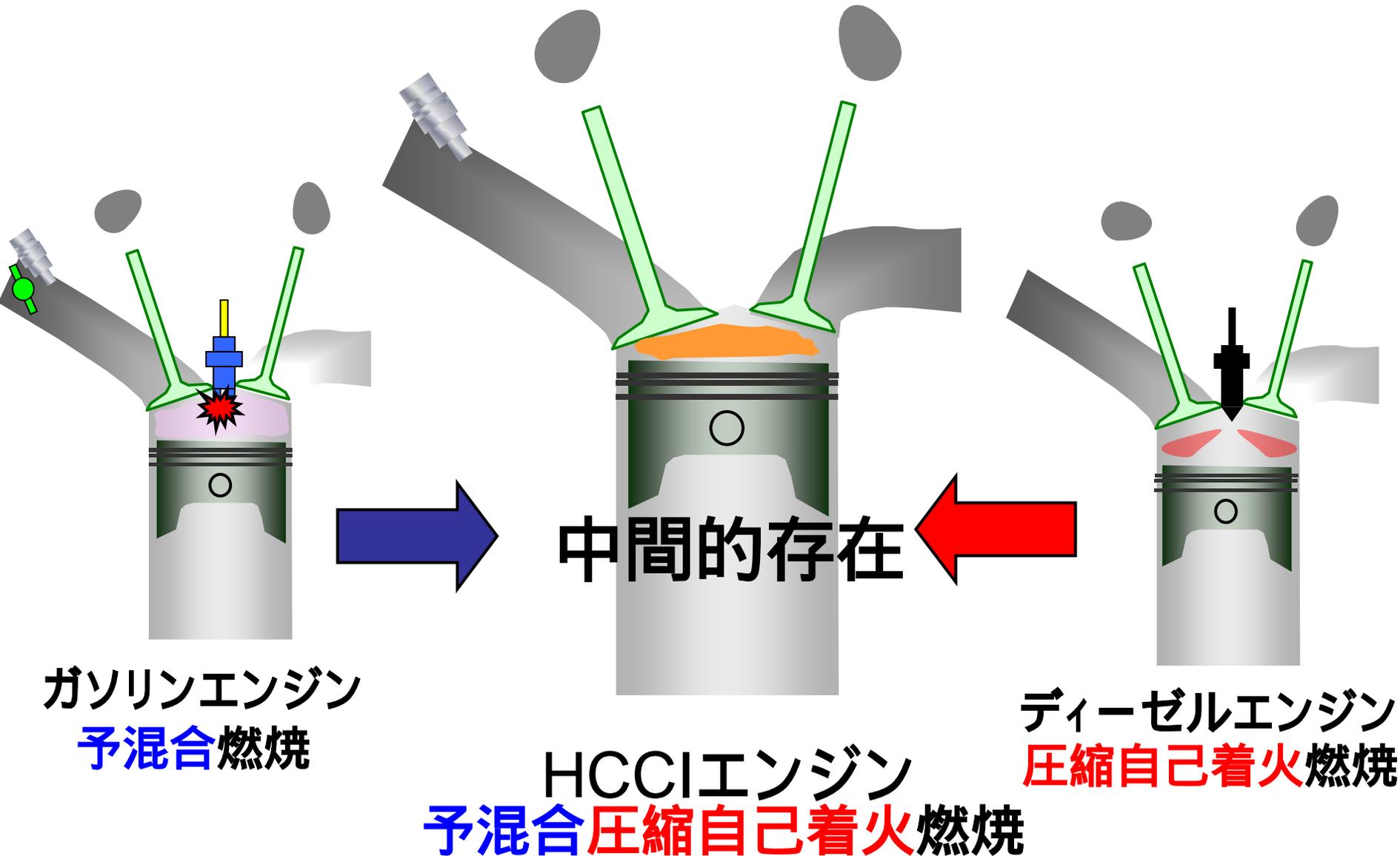
2007年12月5日

新日本石油株式会社  
中央技術研究所

柴田 元

# HCCIエンジンとは？

---

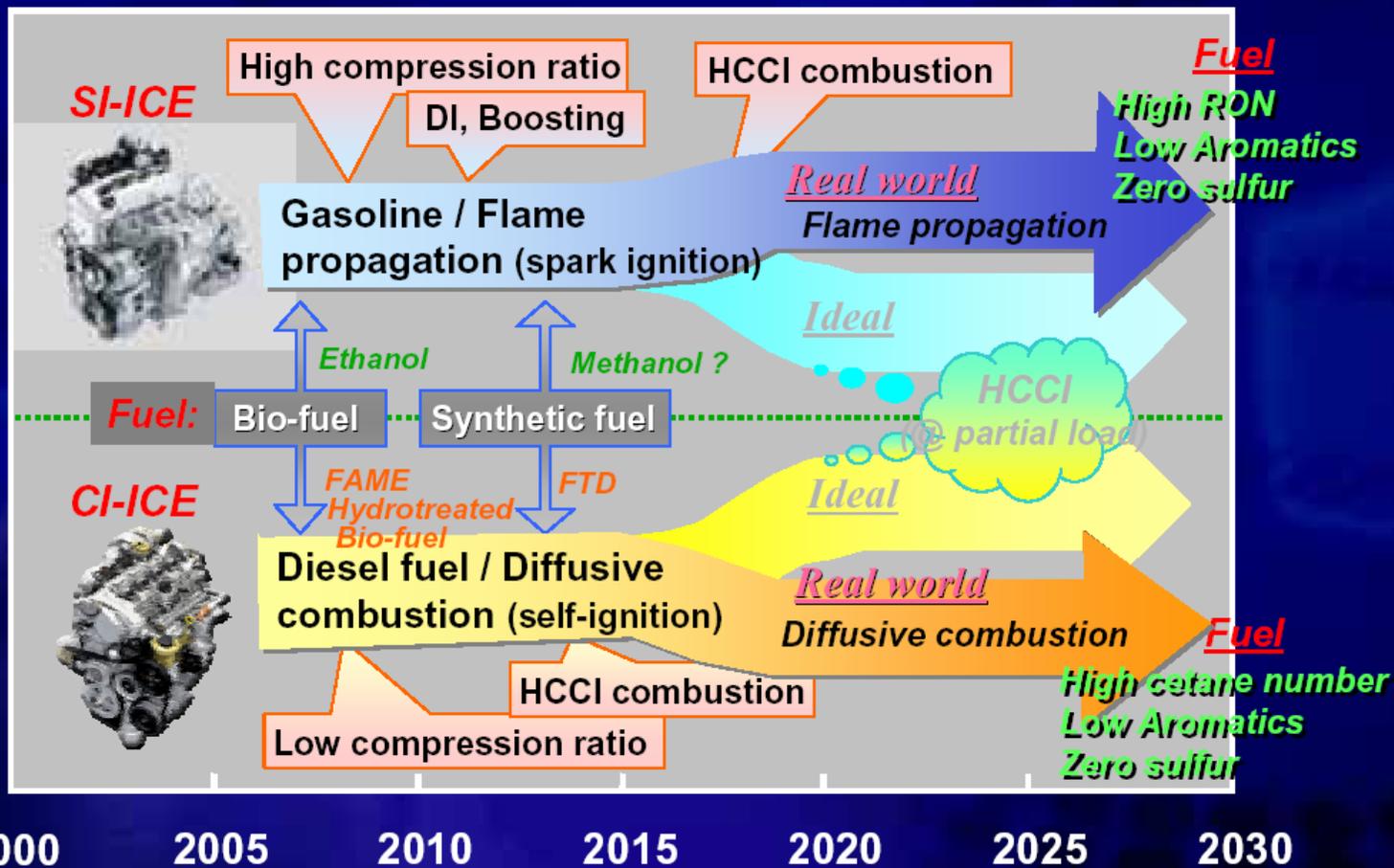


ガソリンエンジン  
予混合燃焼

HCCIエンジン  
予混合圧縮自己着火燃焼

ディーゼルエンジン  
圧縮自己着火燃焼

## Future Outlook of ICE's Evolution





ダイムラー(ベンツ)の  
HCCIコンセプトカー



4-Cylinder-Engine  
2,0 ℓ Displacement  
CR = 16,5  
2 Inlet Valves  
1 Outlet Valve  
Piezo-Common-Rail  
Injection System

VWのHCCIエンジン

# SAE Outline News 2007年10月

## General Motors puts first HCCI prototype on the road

(GMの第2世代HCCI試作車の実車走行に関するニュース)



General Motors recently unveiled its first driveable vehicle powered by a homogeneous-charge compression-ignition (HCCI) gasoline engine—and *AEI* was the first industry trade publication to get one of its editors behind the wheel.

The Saturn Aura-based test mule is powered by a production 2.2-L Ecotec four-cylinder engine, modified for a combination of HCCI and conventional spark-ignition operating modes. Aside from the engine and the usual array of data-acquisition devices, the mule is a standard Aura. According to Matthias Alt, Manager of GM's global HCCI program, HCCI activities have been moved out of R&D and into the advanced-engineering phase of development, which includes road testing. The move signals the automaker's steady progress toward production viability. "In the first half of 2007, we achieved significant gains in the system's computer controls. This moved the program ahead faster than even we ourselves expected," said Alt.

HCCI is a lean-mixture combustion process that offers a 15 to 20% leap in fuel efficiency when applied to a gasoline engine. In principle, it combines the attributes of gasoline and compression-ignition (diesel) engines—primarily gasoline's inherently low emissions and relatively simple, low-cost aftertreatment equipment, and diesel's low fuel consumption.

Like a diesel engine, the HCCI gasoline engine operates without a throttle restriction. In the combustion process, a nearly evenly distributed (homogeneous) mixture of fuel, air, and captured exhaust gas is compressed in the cylinders so that the mixture spontaneously ignites, as in a diesel. Because there is no flame front to trigger and control this ignition, HCCI produces low peak temperatures and thus extremely low engine-out levels of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>).

Sustaining HCCI operation at very light loads and also at high loads has been one of the greatest challenges in developing the process. For example, during light loads and ultra-lean air-fuel conditions, the descending piston has a cooling effect known as "bulk quenching" that extinguishes the chemical reactions within the combustion gases.

This causes peak cycle temperatures under 1500 K (2240—F), noted HCCI expert Dennis Assanis, Professor of Engineering and Director of the Walter E. Lay Automotive Laboratory at the University of Michigan.

Until practical solutions to these and related challenges are found, GM is road-testing multimode engines such as the one installed in the Aura mule. These are configured to operate in HCCI mode from 1000 to 3000 rpm, and in conventional spark-ignition (SI) mode from start-up to 1000 rpm and from 3000 rpm to wide-open throttle.

During *AEI*'s test drive at GM's Milford Proving Ground, a load vs. engine speed plot on a laptop computer fitted between the front seats depicted the engine transitioning from HCCI to SI. By modulating the gas pedal, it was easy to keep the vehicle (carrying four passengers) within the HCCI zone. Although the test exercise was limited to 50 mph (81 km/h), it showed how the current 2000-rpm operating zone would put HCCI fuel efficiency into most typical duty cycles.

A faint rattling noise reminiscent of the post-ignition common in many mid-1970s engines was detected during the transition between the Aura mule's combustion modes. GM is working to minimize or eliminate this noise as it aims to extend the HCCI operating zone up and down the load range, according to Alt.

The Aura's engine was equipped with the four key technology enablers (direct injection, two-step valve lift, electric phasing of the intake and exhaust camshafts, and cylinder pressure sensors) first reported in the February 2007 edition of *AEI*. In addition, the engine's HCCI mode is managed by a dedicated dSpace prototype control unit.

The multiphase fuel injectors located in the center of the combustion chamber are off-the-shelf items also used in GM's turbocharged-DI Ecotec. They operate at 2900 psi (200 bar). The engine's electric cam phasers are required for HCCI because they are faster-acting and have higher authority (they can change positions over a broader range) than conventional hydraulic phasers, according to Paul Najt, Manager of GM's Powertrain Systems Research Lab. Najt has been involved with HCCI R&D since the 1970s.

As GM's HCCI program progresses towards production, Alt said GM's global powertrain team is developing HCCI to be robust for the global environment.

"We're working to make it so that running an HCCI vehicle on any fuel in Florida in the summer is no different than running it in Denver in the winter," he said.

Lindsay Brooke

2007年12月5日 同志社セミナー (京都)

# 研究の動機

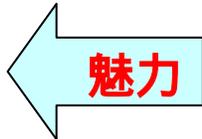
## ガソリンエンジンの短所

- ・熱効率が低い
  - ポンプロス
  - 着火源が一つしかない
  - 火炎伝播律速 筒内流動(スワール、タンブル)の積極利用 = 1.0の燃焼

## ディーゼルエンジンの短所

- ・低負荷領域での排出ガス性能
- 触媒温度が低い領域でのNOx性能

### < HCCIのメリット >

- ・熱効率はディーゼル並  ガソリンエンジン研究者
  - ・NOxの排出が低い  ディーゼルエンジン研究者
- (NOxが生成される高温場がシリンダ内にできない)

ディーゼルHCCI

HCCI研究

ガソリンHCCI

Cold EGR

- ・着火性を下げる
- ・予混合時間を稼ぐ

Hot EGR

- ・着火性を上げる

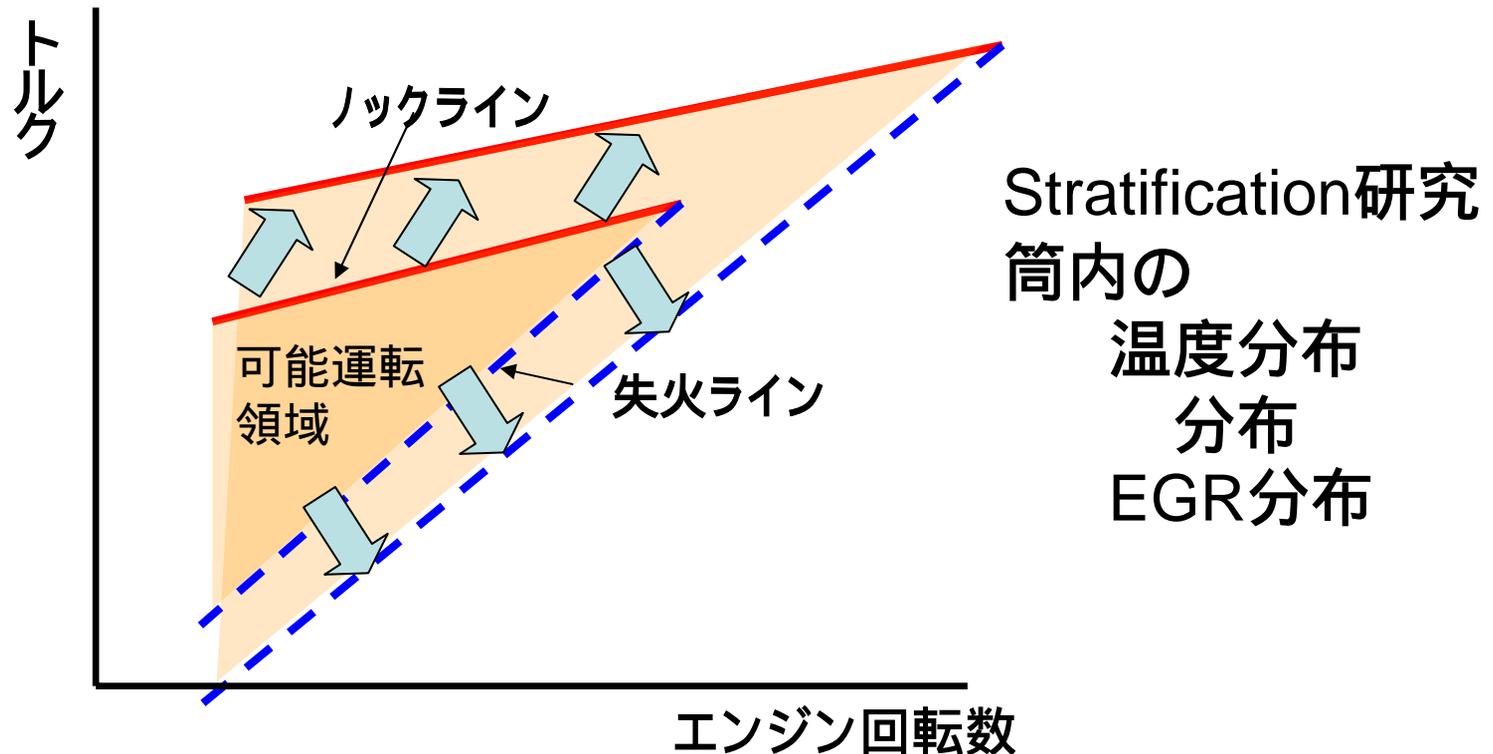
# 研究の背景と研究目的・・・HCCIの長所短所

## < 予混合化によるデメリット >

- ・着火条件(温度、分布)が筒内で同一のため、着火が同時に起こる

ノッキングによって負荷が上げられない

- ・燃料の組成がもつ着火性の影響を受けやすい

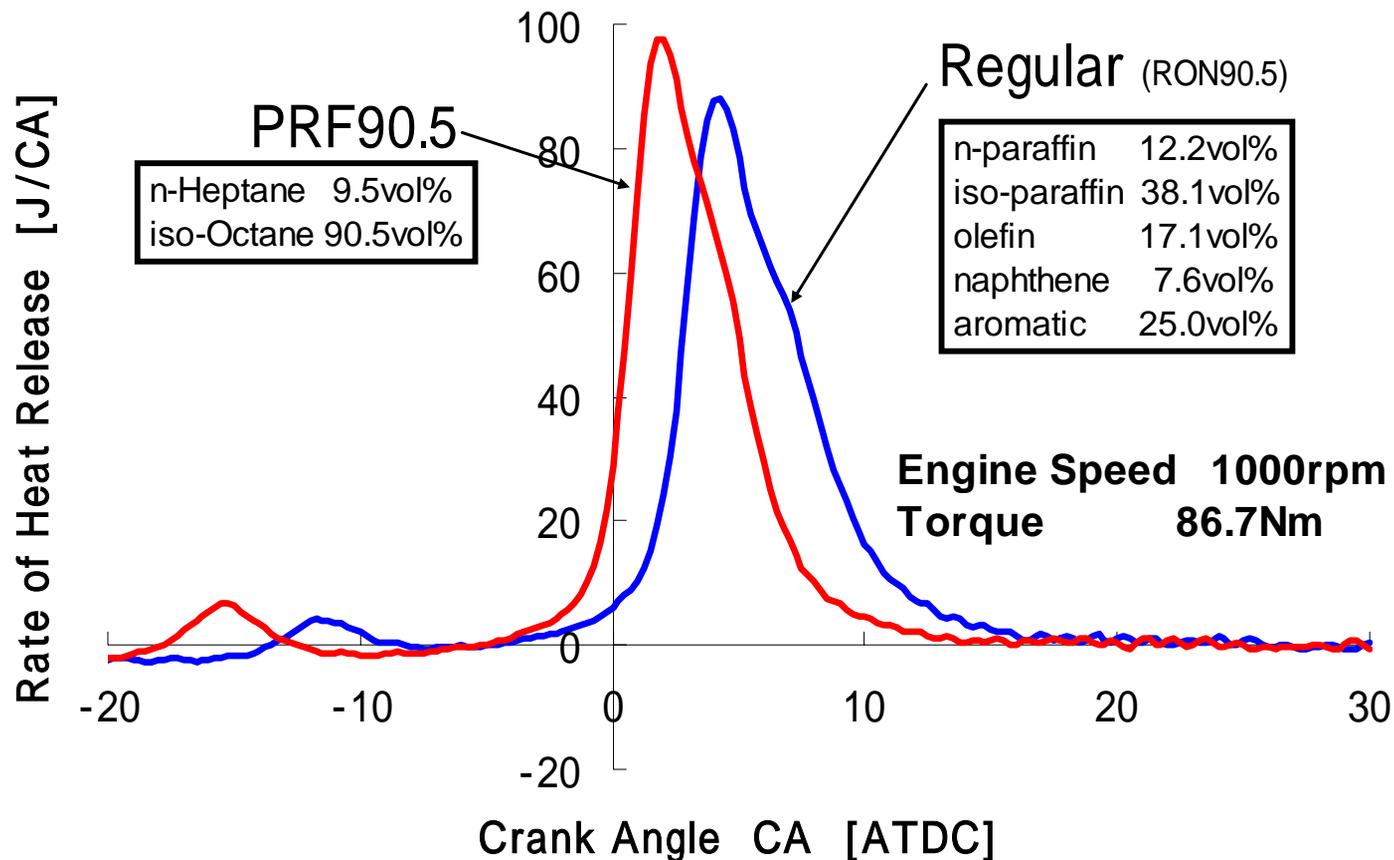


# HCCI研究の取り組み

---

- 課題1・・・ディーゼル燃焼からのアプローチ (Diesel HCCI、PCCI)
  - ・触媒が効かない負荷領域でのPCCI燃焼の実現
- 課題2・・・ガソリンHCCIの開発研究 (Gasoline HCCI)
  - ・ノッキングを回避するためのStratification研究
  - ・SI - HCCI - SI切り替え運転制御
  - ・排出ガス(HC、CO)の低減
- 課題3・・・燃焼シミュレーション研究
  - ・化学動力学計算
- 課題4・・・燃料の研究 (SwRI、Shell、新日石)
  - ・燃料の組成が運転性能に与える研究

# 自己着火が燃料の組成に委ねられている例



HCCI燃焼では同一オクタン価であっても  
熱発生パターンは異なる  
( 燃料組成の影響 )

# 研究の対象

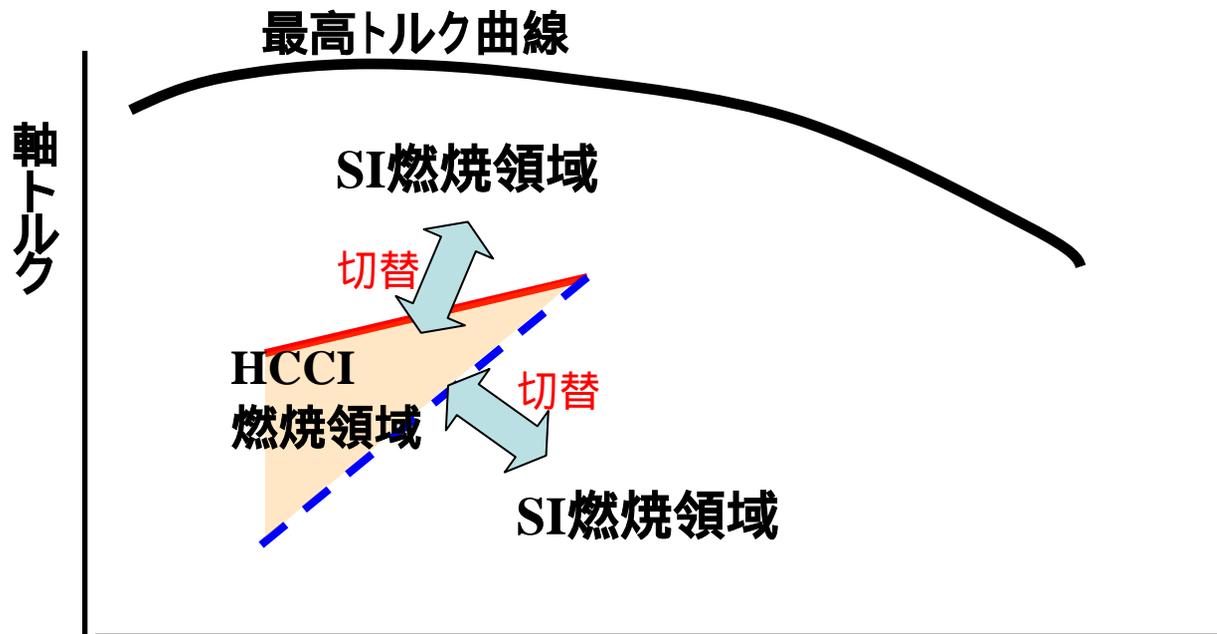
## < 燃料のHCCI燃焼研究の対象 >

炭化水素の着火性の研究

燃料でHCCI運転領域を広げられるだろうか？

オクタン価に関する研究(付随研究)

- ・自己着火という意味ではHCCI燃焼とガソリンノックは着火条件は異なるが、現象としては同じ



# 講演のメニュー

---

## 第1章 着火の概要

- ・低温酸化反応とインヒビター作用
- ・高温酸化反応が起こる温度圧力条件

## 第2章 相対的着火性指標であるオクタン価

- ・RONやMONの本質
- ・HCCIインデックスの紹介

# 講演のメニュー

---

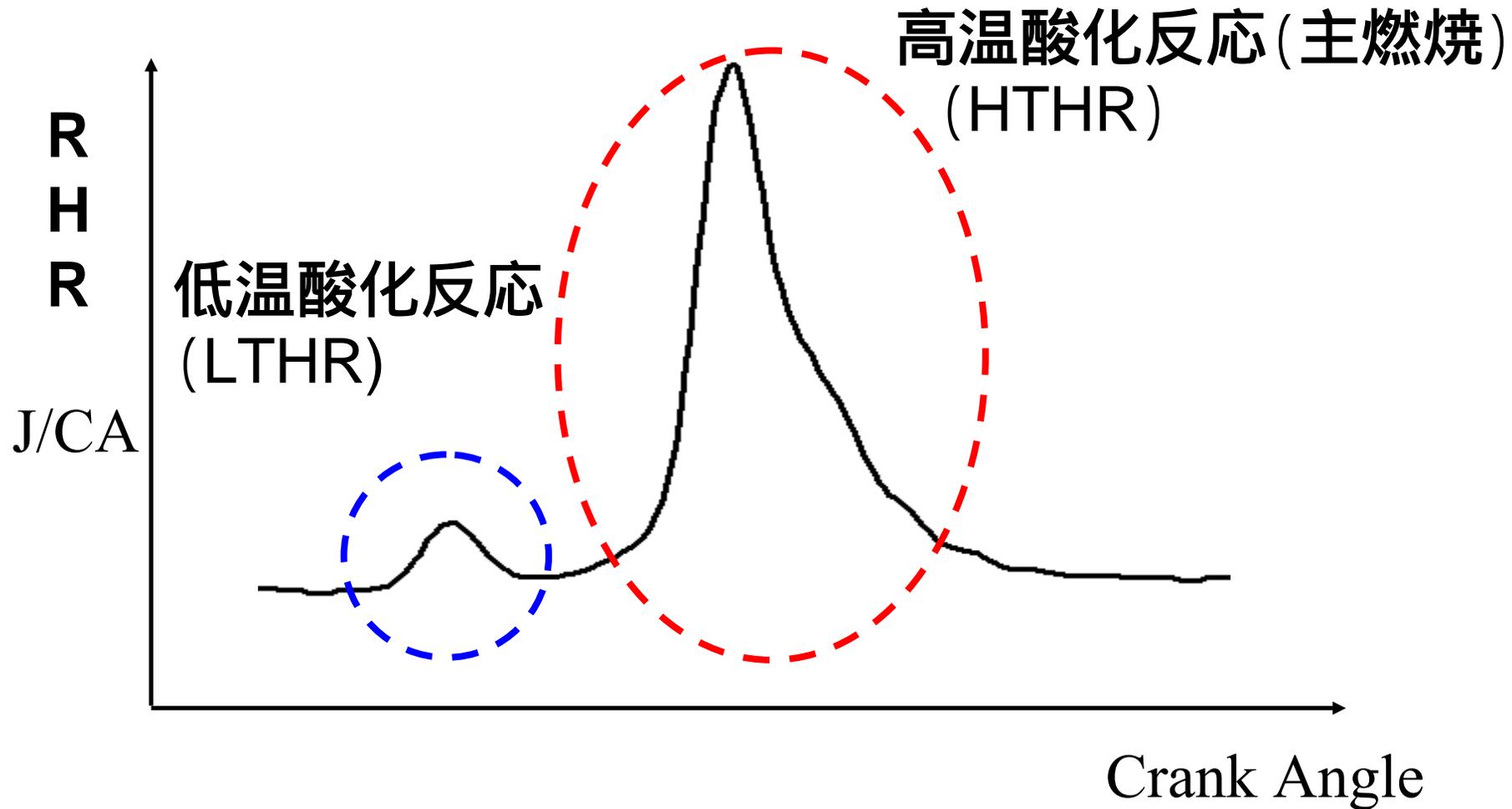
## 第1章 着火の概要

- ・低温酸化反応とインヒビター作用
- ・高温酸化反応が起こる温度圧力条件

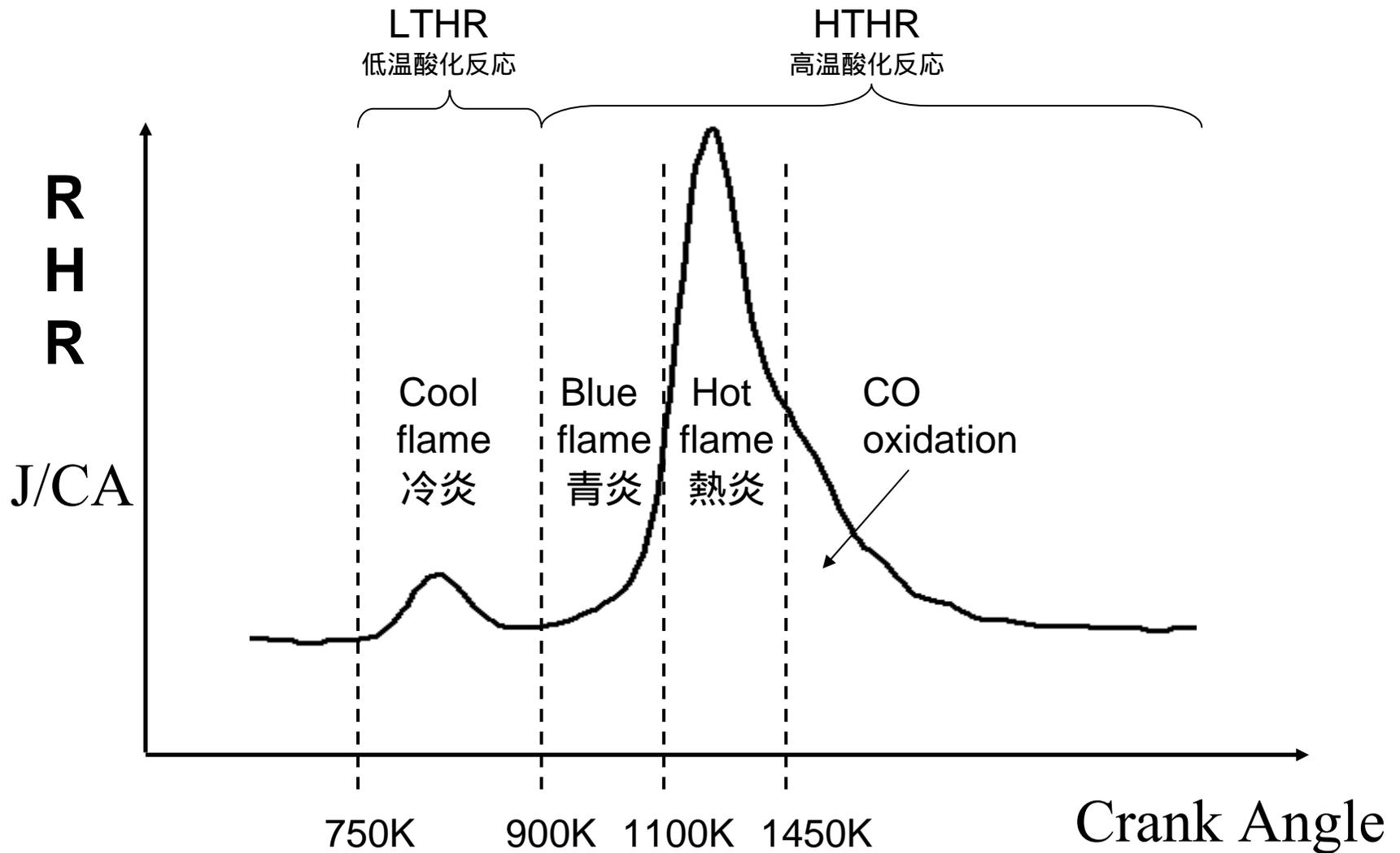
## 第2章 相対的着火性指標であるオクタン価

- ・RONやMONの本質
- ・HCCIインデックスの紹介

# HCCI燃烧・・・2 Stage Combustion

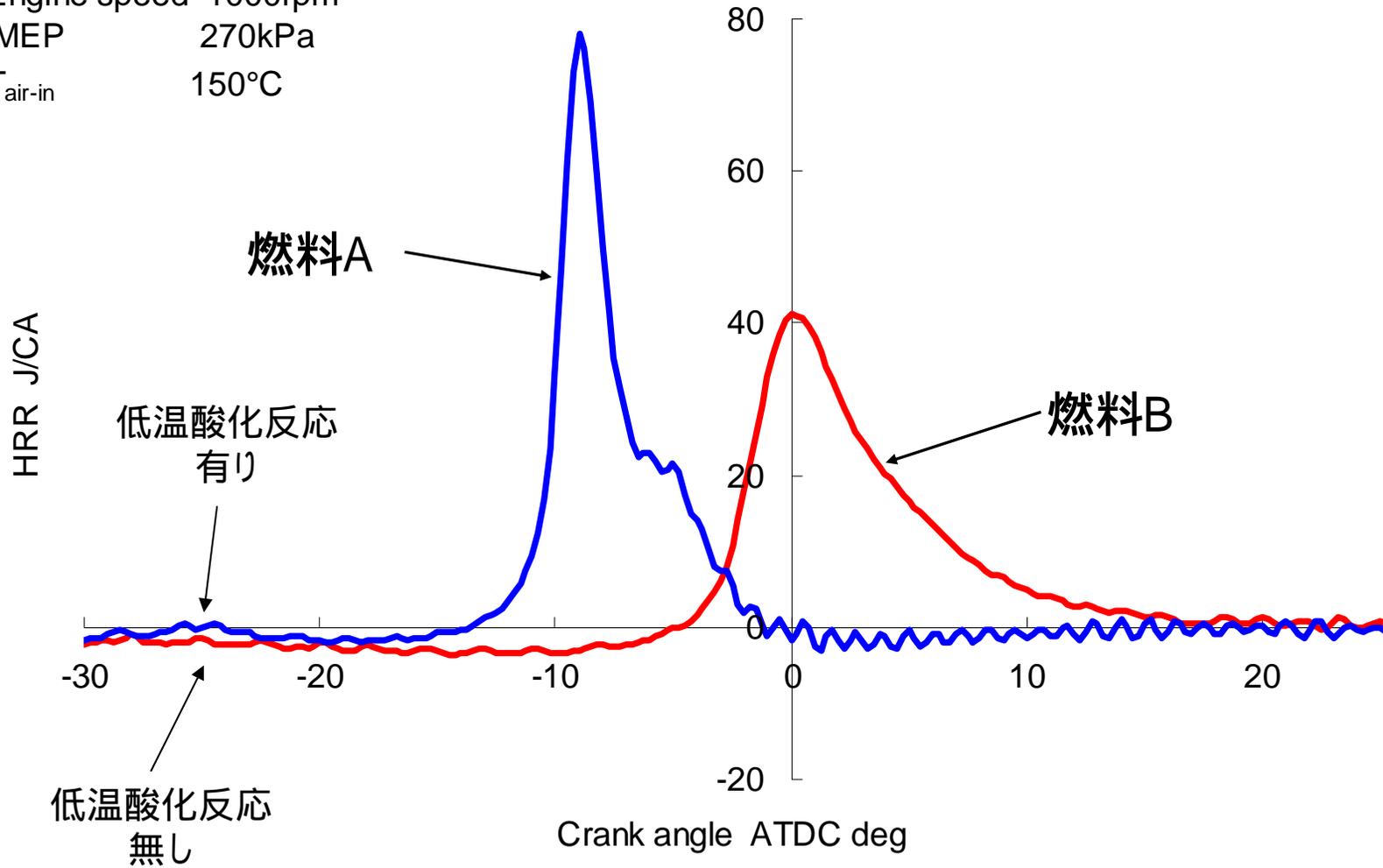


# HCCI燃烧・・・2 Stage Combustion

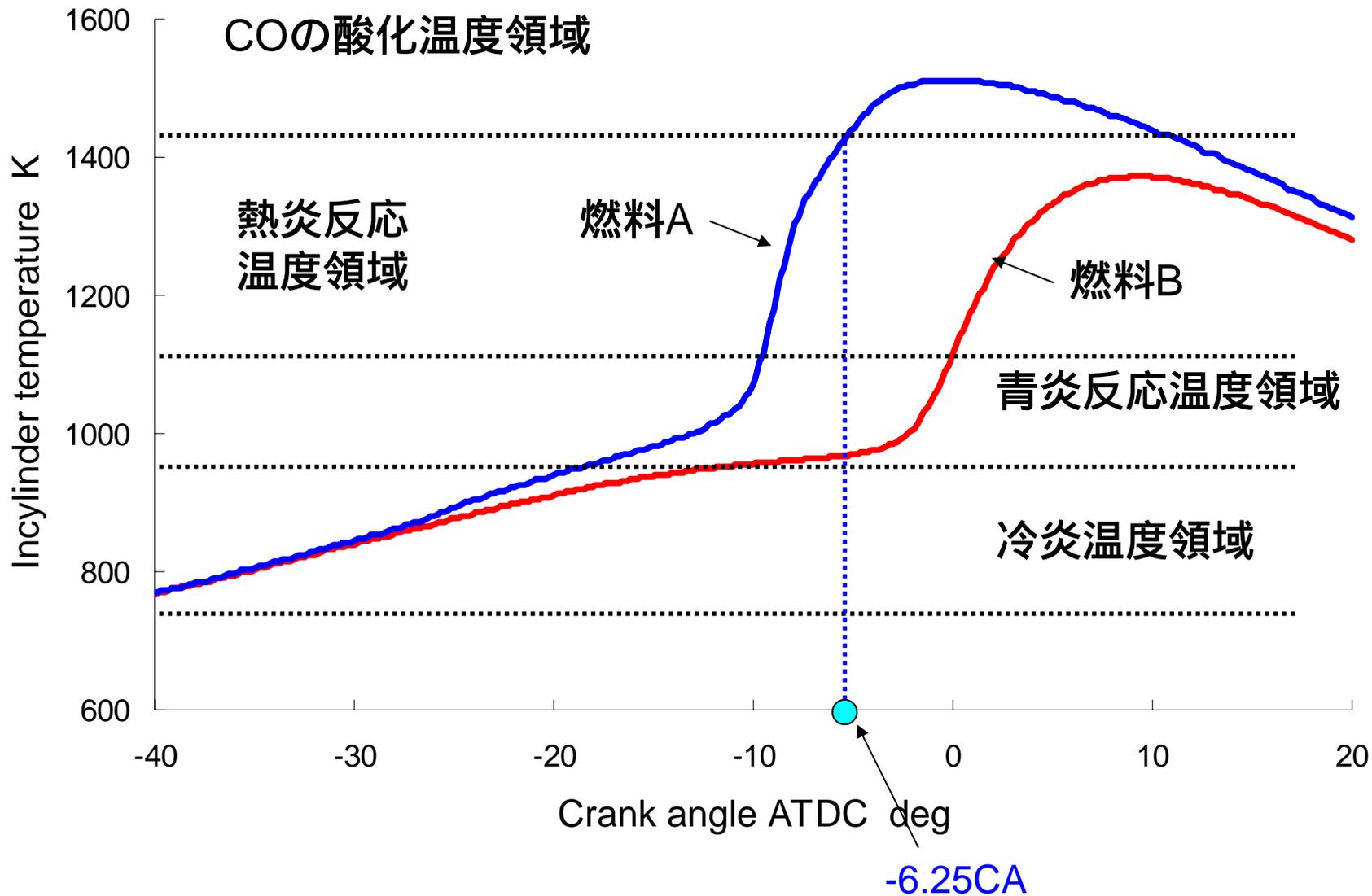


# 低温酸化反応が燃焼に与える影響

Engine speed 1000rpm  
IMEP 270kPa  
 $T_{\text{air-in}}$  150°C

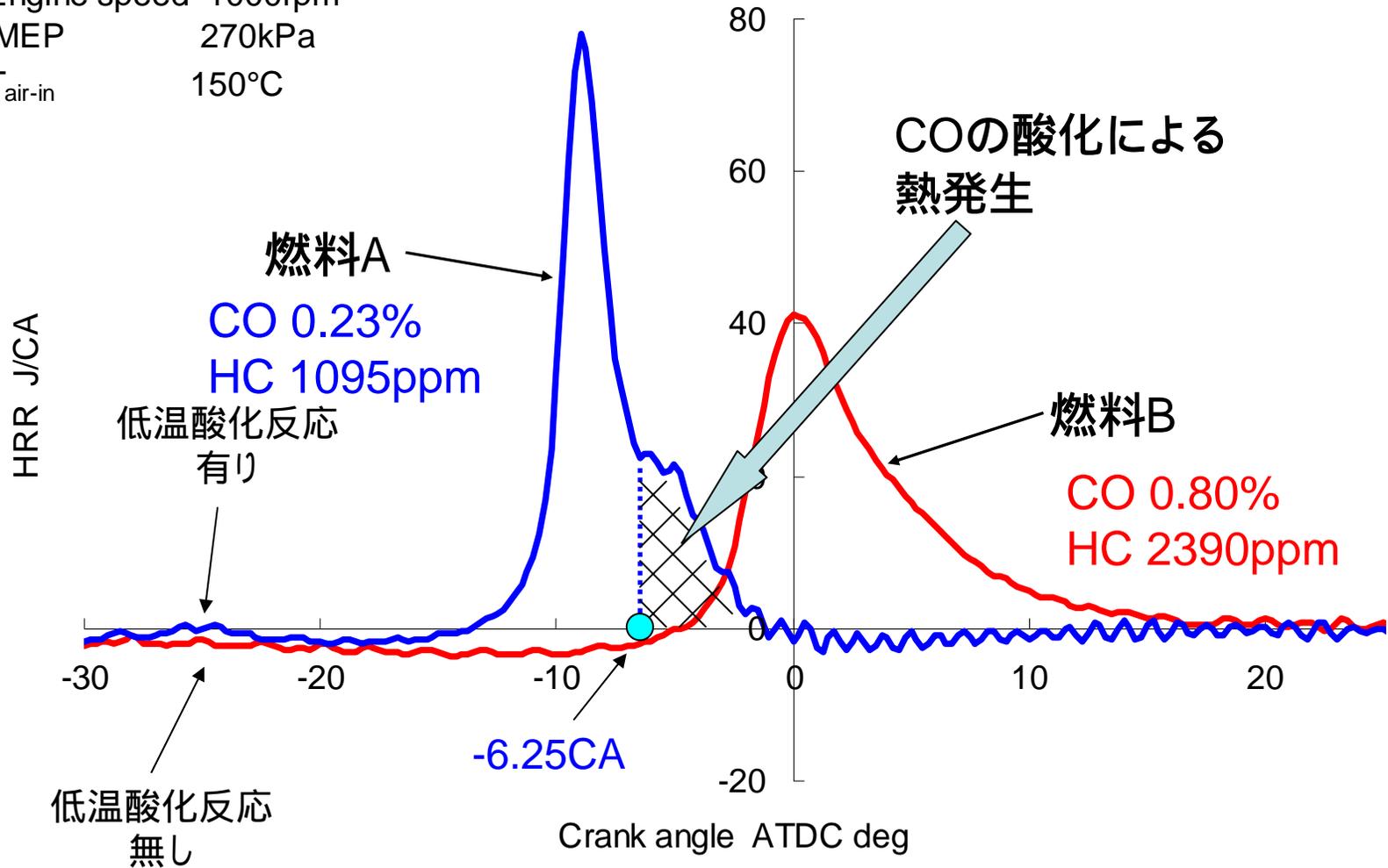


# 低温酸化反応が燃焼に与える影響



# 低温酸化反応が燃焼に与える影響

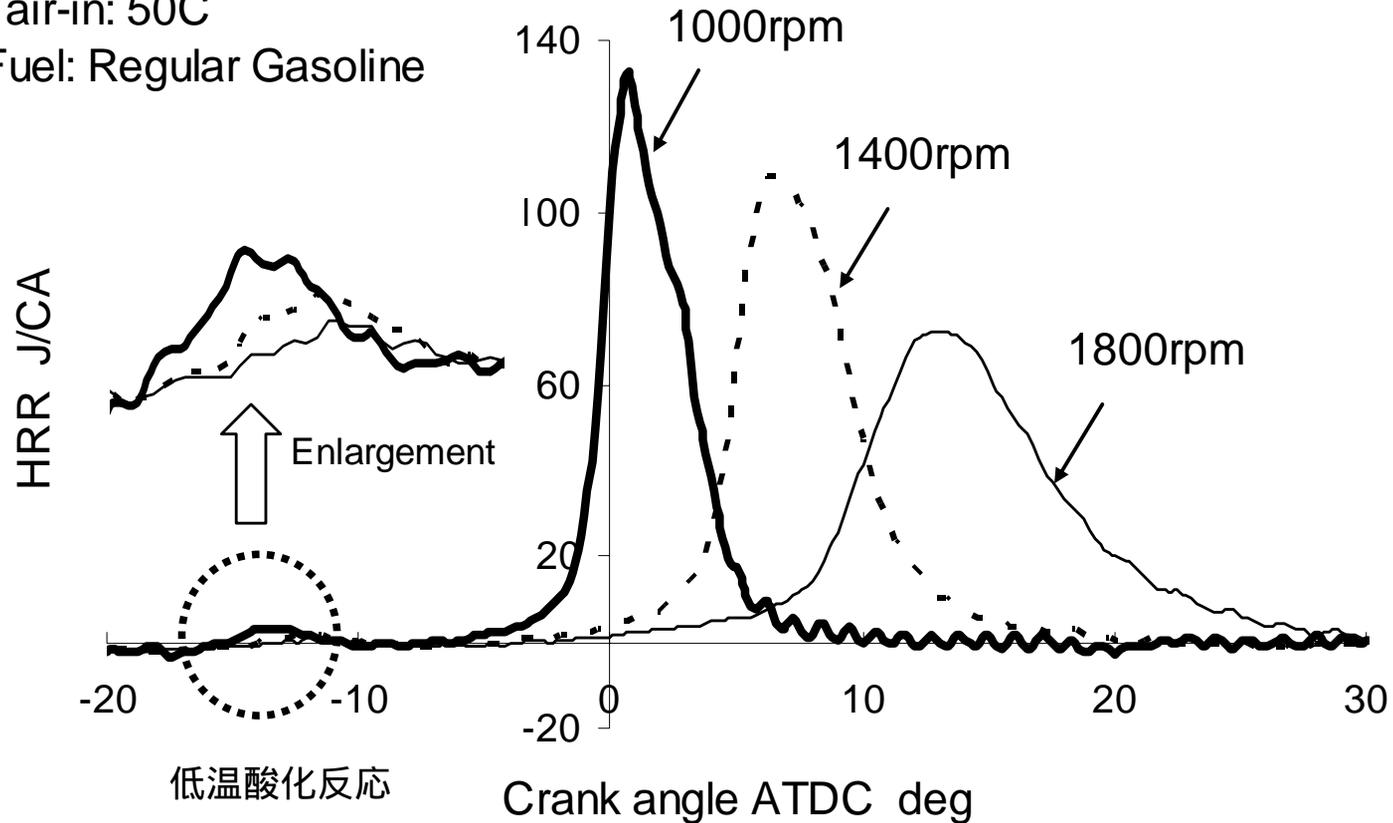
Engine speed 1000rpm  
IMEP 270kPa  
 $T_{\text{air-in}}$  150°C



# 低温酸化反応が燃焼に与える影響・・・反応律速

Tair-in: 50C

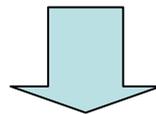
Fuel: Regular Gasoline



高回転化により・・・

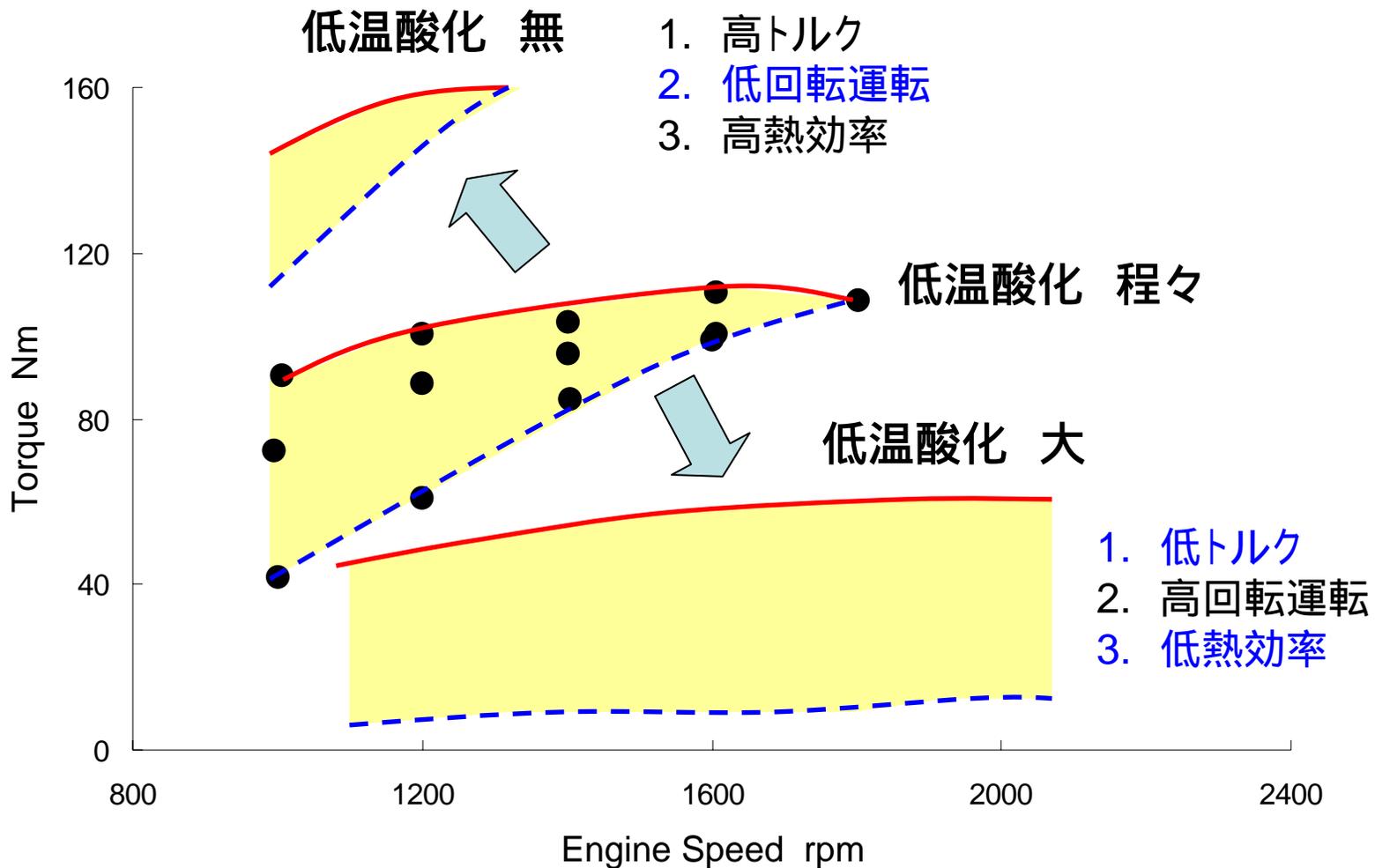
低温酸化反応が縮退

(750-900Kを通過する時間が短いから)

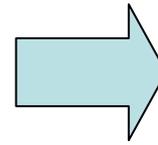
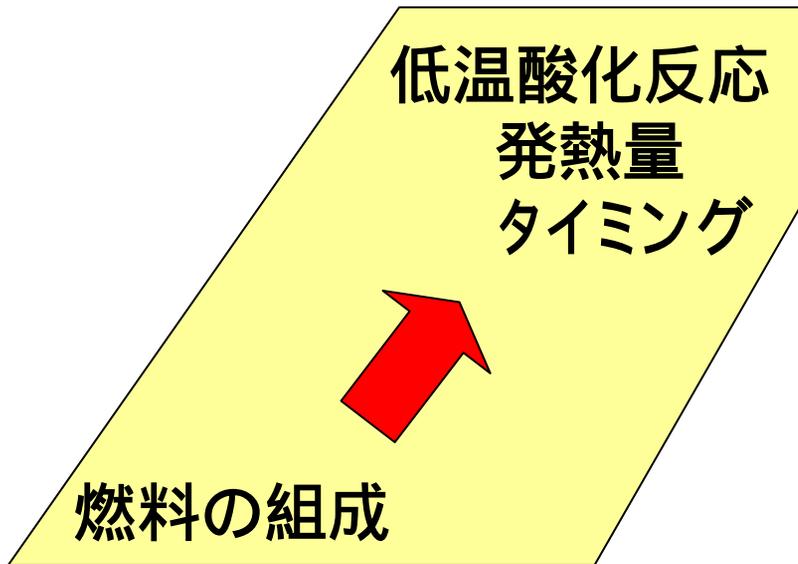


高温酸化反応(主燃焼)が遅れる

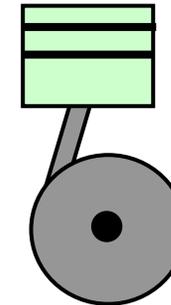
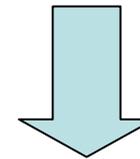
# 低温酸化反応が運転領域に与える影響



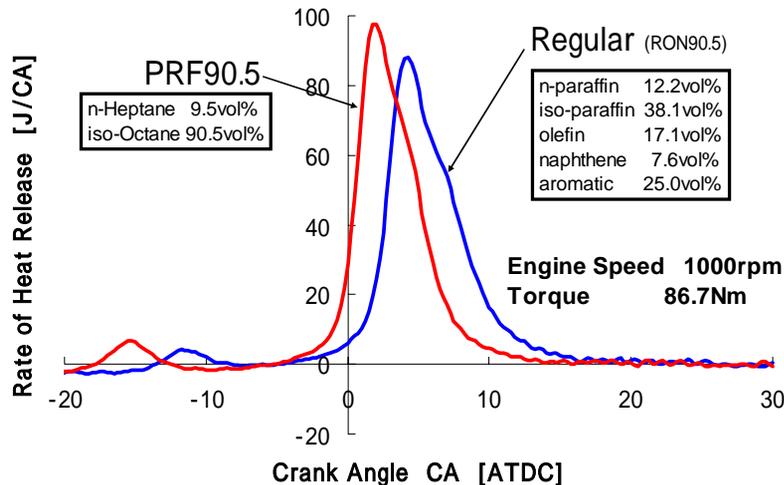
# 低温酸化反応がエンジンの性能を決めている



高温酸化反応  
タイミング



エンジン性能  
運転領域(負荷、回転)  
排出ガス特性



# 低温酸化反応で起きていること

## < 750-850Kの反応 >

### < 開始反応 >



### < 酸素付加と異性化 >



### < 第2酸素付加と連鎖分岐 >



## < 850-900Kの反応 >

### < 過酸化水素の蓄積 >



### < 高温酸化反応の開始 >



**着火**

< 出典: 越光男 機械の研究 第56巻 第12号 pp1215-1222 >

# 低温酸化反応で起きていること

## < 750-850Kの反応 >

### < 開始反応 >

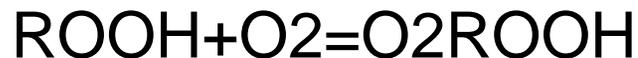


(OHラジカルが開始反応をまわしている)

### < 酸素付加と異性化 >

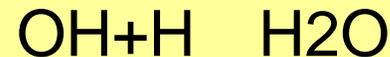


### < 第2酸素付加と連鎖分岐 >



### ケース1

脱水素反応を起こし易い炭化水素



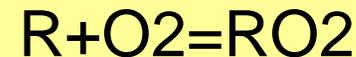
OHラジカルを消費し

開始反応が回らなくなる

インヒビター作用

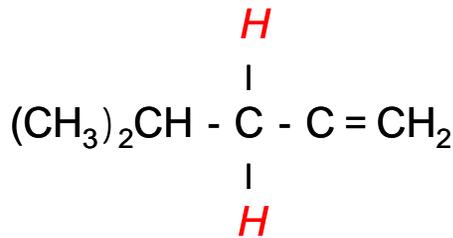
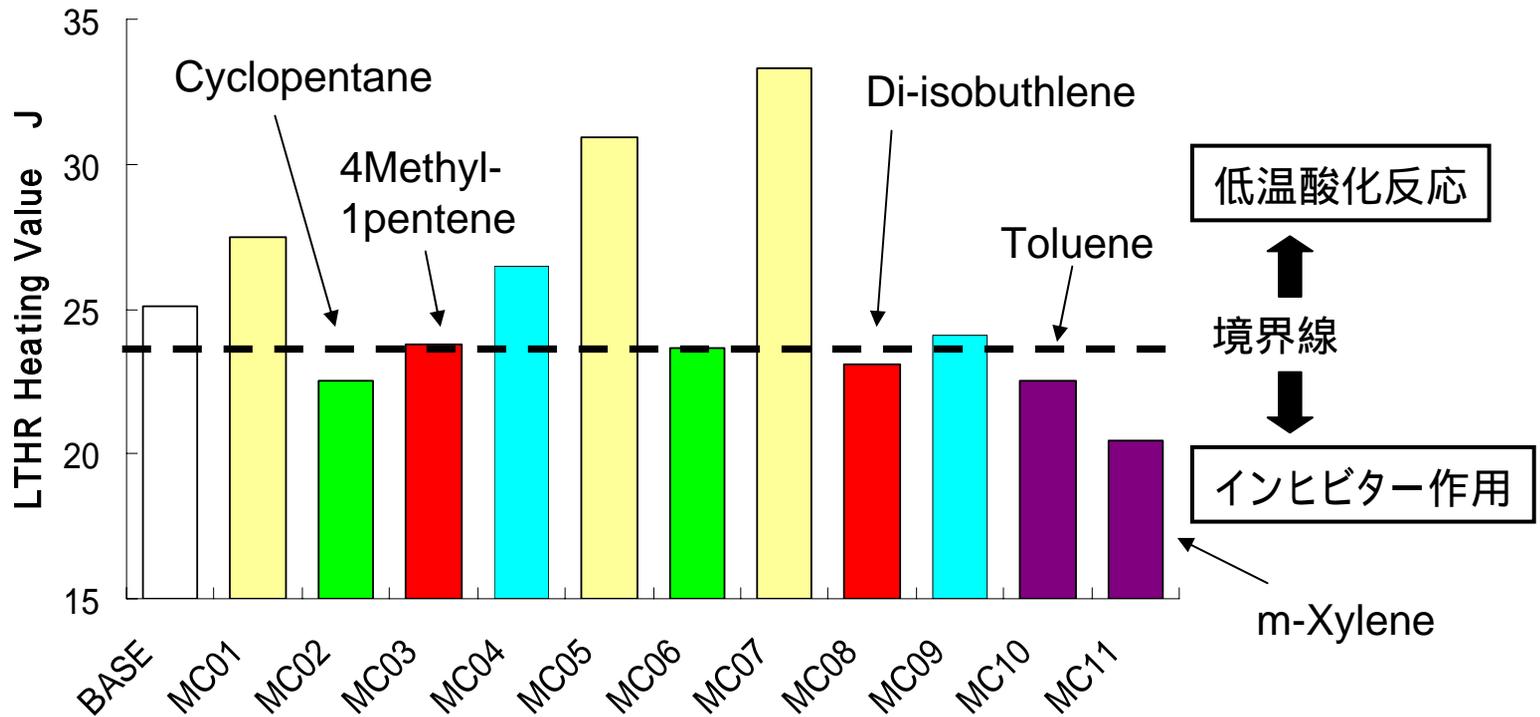
### ケース2

出来たRラジカルが安定な炭化水素

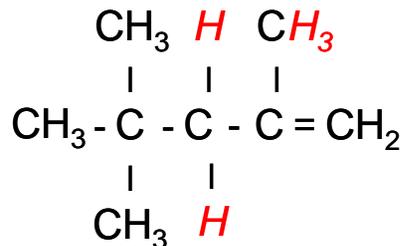


の反応が進まなくなり、低温酸化反応が止まる

# インヒビター作用を起こす炭化水素と原理

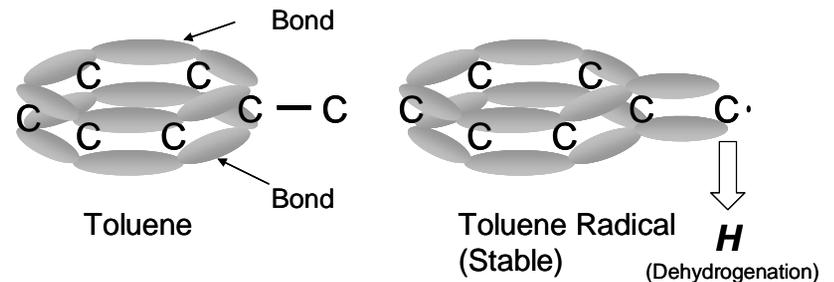


4Methyl-1pentene



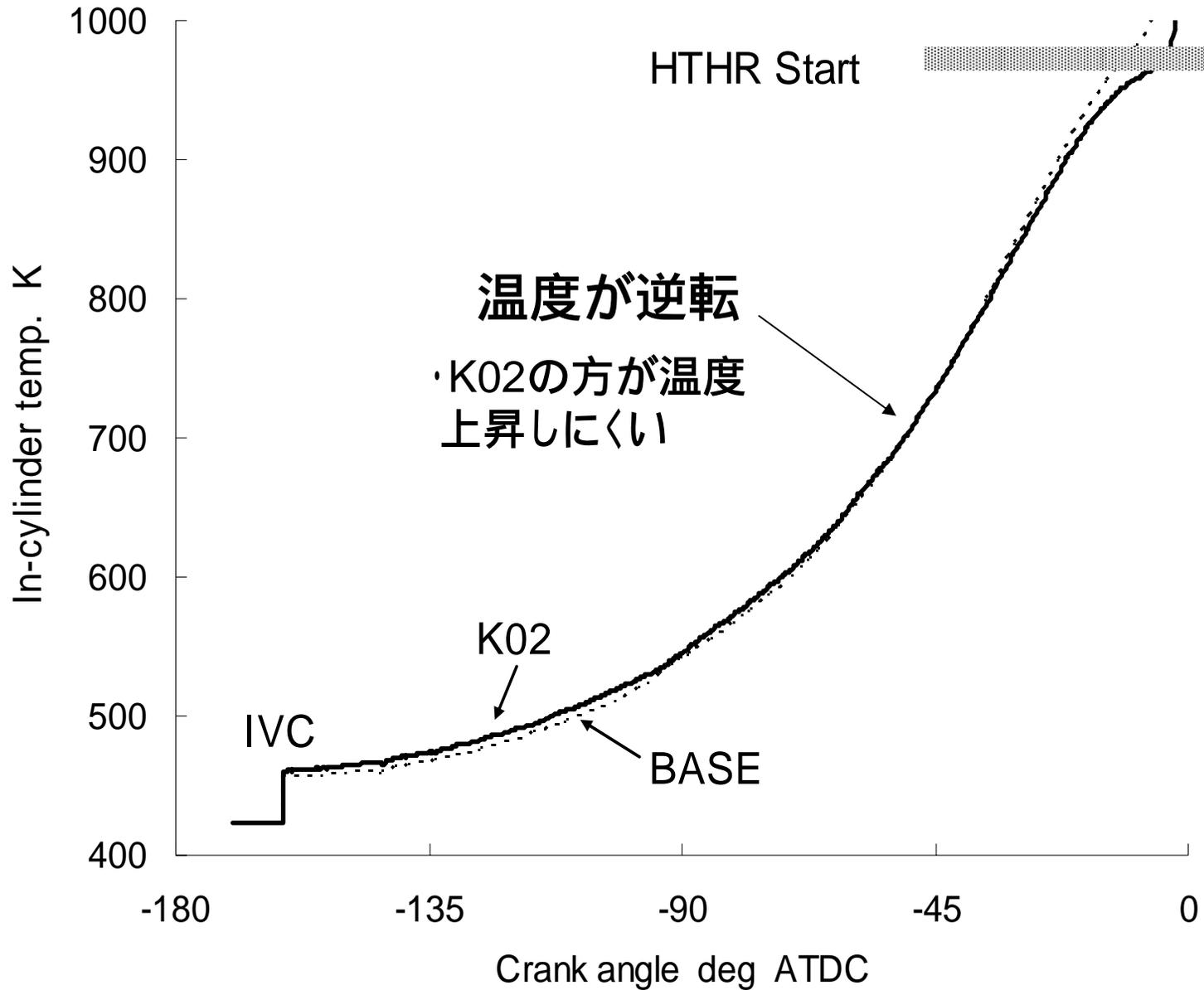
Di-isobutylene  
(224 Trimethyl-1pentene)

脱水素反応を起こしやすい



反応途中でラジカルを作り安定化する

# 着火の遅延 (シクロペンタン)



# 着火の遅延 (シクロペンタン)

	Equivalent mole against n-Hexane	Specific heat ratio (700K 1atm)
	mol	Cp/Cv
n-Hexane	1.00	1.03
Cyclopentane	1.26	1.04
Cyclohexane	1.05	1.03
2Methylpentane	1.00	1.03
Toluene	1.03	1.04

# 着火の特性と炭化水素のタイプ

低温酸化反応大の炭化水素  
・ノルマルパラフィン

低温酸化反応小の炭化水素  
・イソパラフィン

活性基(OHラジカル)を  
食べる炭化水素  
・オレフィンの一部  
・ナフテンの一部

何にもしない炭化水素  
・アロマ

温度上昇を遅らせる炭化水素  
・シクロペンタンなど

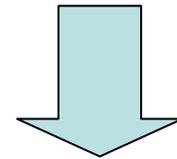
低温酸化反応  
(+の発熱)

インヒビター作用  
(-の発熱)

総体

(低温酸化反応 + インヒビター)

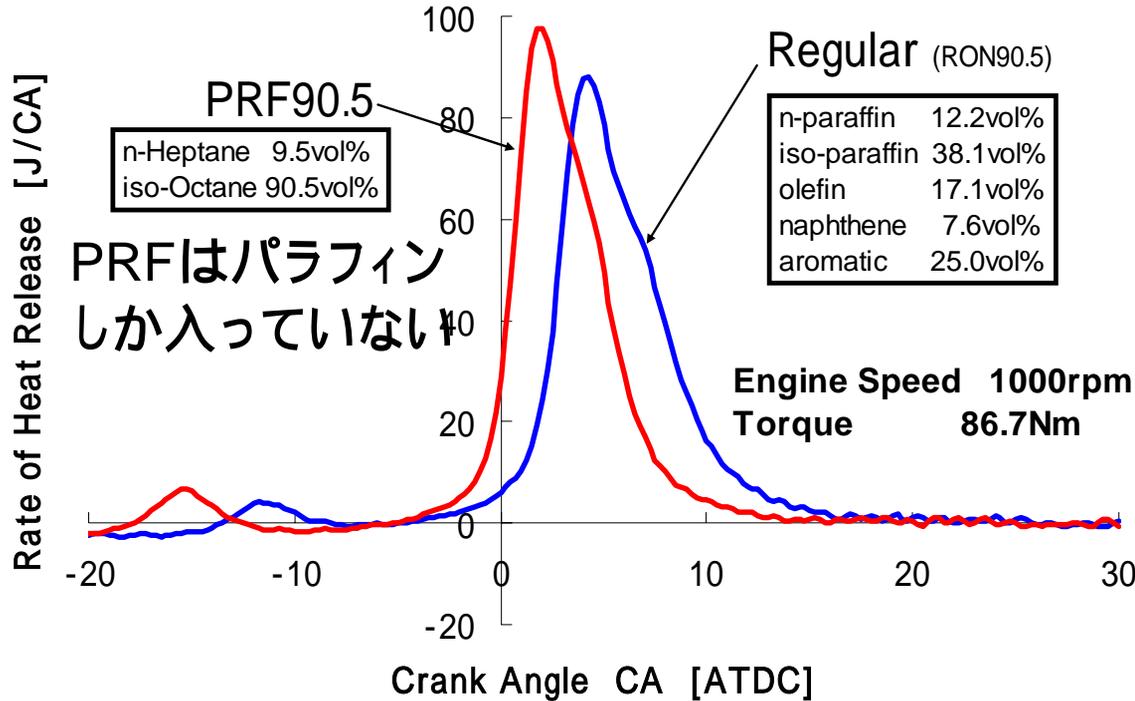
・発熱量  
・発現のタイミング



高温酸化反応

・発現のタイミング

# 燃料の組成と自己着火



燃料中の炭化水素の  
構成比がHCCI燃焼に  
影響を与えている

## レギュラーガソリンの組成

	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Total
n-paraffins	2.06	4.59	3.65	0.97	0.44	0.45	12.16
iso-paraffins	1.16	10.02	11.27	6.8	4.42	4.47	38.14
naphthenes	0	0.31	1.53	2.23	2.5	1.03	7.6
olefins	2.33	5.07	4.44	3.3	1.24	0.72	17.1
aromatics	-	-	0.54	8.43	4.67	9.92	23.56

- ・強い低温酸化反応性を示すノルマルパラフィンが少ない
- ・インヒビター作用を示す炭化水素含有量が多い

# 高温酸化反応が起こる温度圧力条件

## < 750-850Kの反応 >

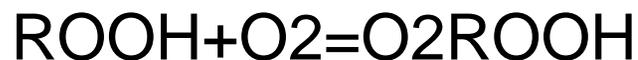
### < 開始反応 >



### < 酸素付加と異性化 >



### < 第2酸素付加と連鎖分岐 >



## < 850-900Kの反応 >

### < 過酸化水素の蓄積 >

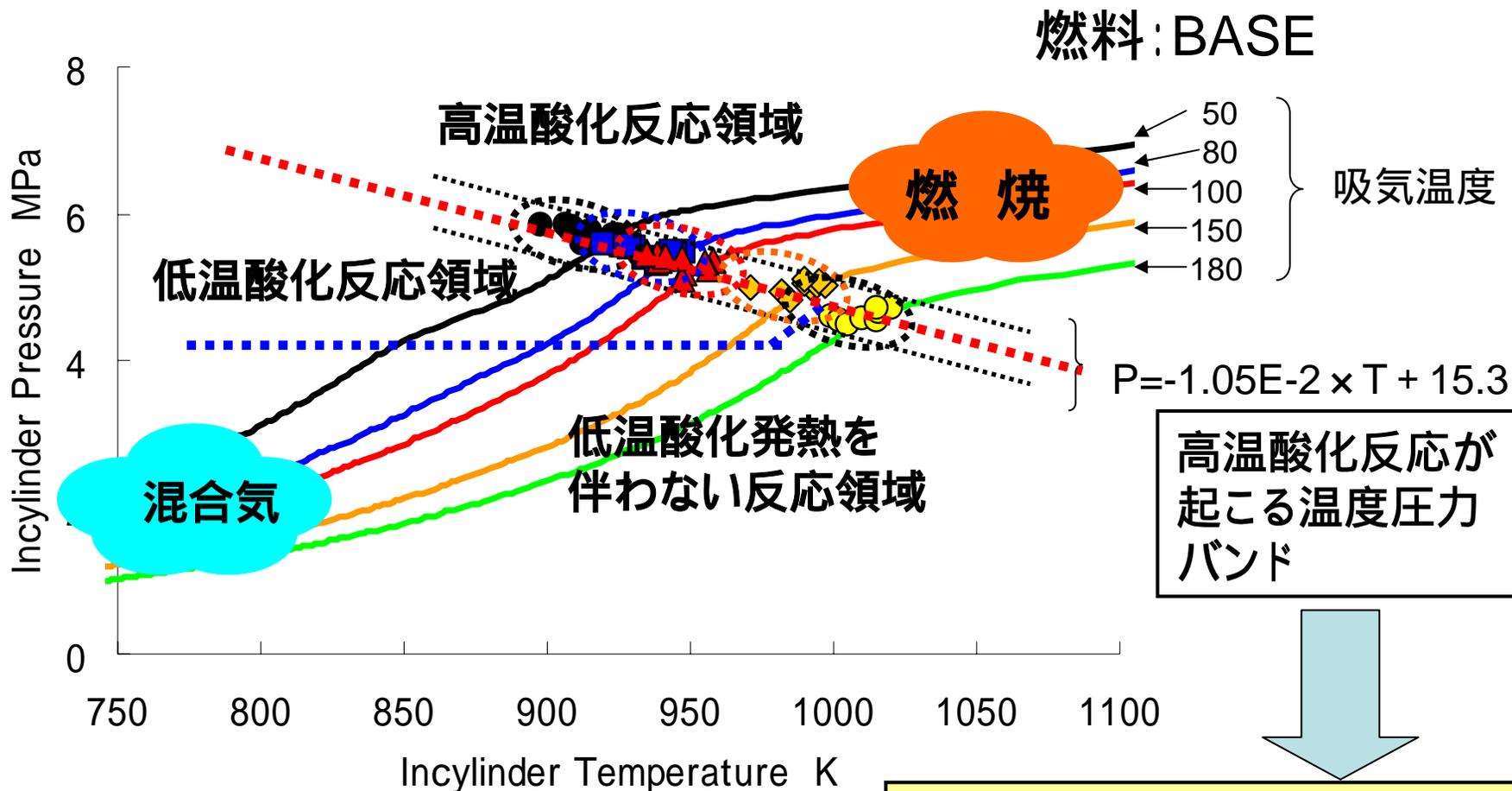


### < 高温酸化反応の開始 >



着火

# 高温酸化反応が起こる温度圧力条件



# 第一章のまとめ

---

1. 燃料を構成する各炭化水素が持つ低温酸化反応とインヒビター作用が相互に作用して高温酸化反応が立ち上がるタイミングを決めている。
2. 低温酸化反応を起こす炭化水素はノルマルパラフィン及びイソパラフィンである。
3. インヒビター作用を起こす炭化水素が存在する
4. 高温酸化反応が立ち上がる温度圧力条件がある。  
これは低温酸化反応中に蓄積される過酸化水素がOHラジカルに分解する条件である。

# 講演のメニュー

---

## 第1章 着火の概要

- ・低温酸化反応とインヒビター作用
- ・高温酸化反応が起こる温度圧力条件

## 第2章 相対的着火性指標であるオクタン価

- ・RONやMONの本質
- ・HCCIインデックスの紹介

# RONとMONの計測条件

リサーチ法オクタン価

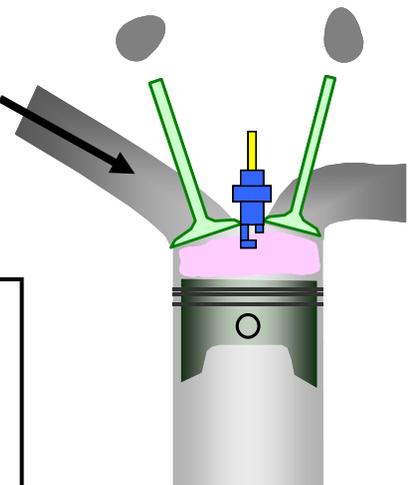
**RON計測**

空気調整器  
(小ヒーター)

キャブレター

19.4-59.4

この温度をその日の気温  
と大気圧で変更 (空気量 (質量)  
が一定になるようにしている)



自然吸気エンジン

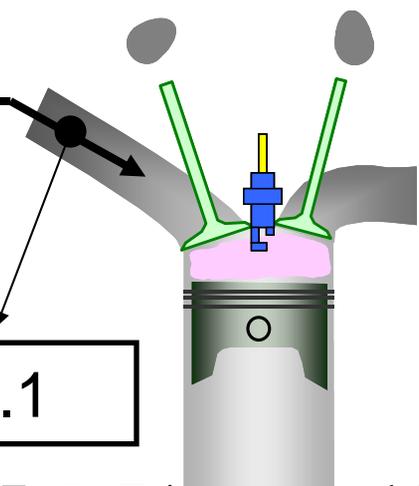
モーター法オクタン価

**MON計測**

ヒーター

38 ± 2.8

149 ± 1.1



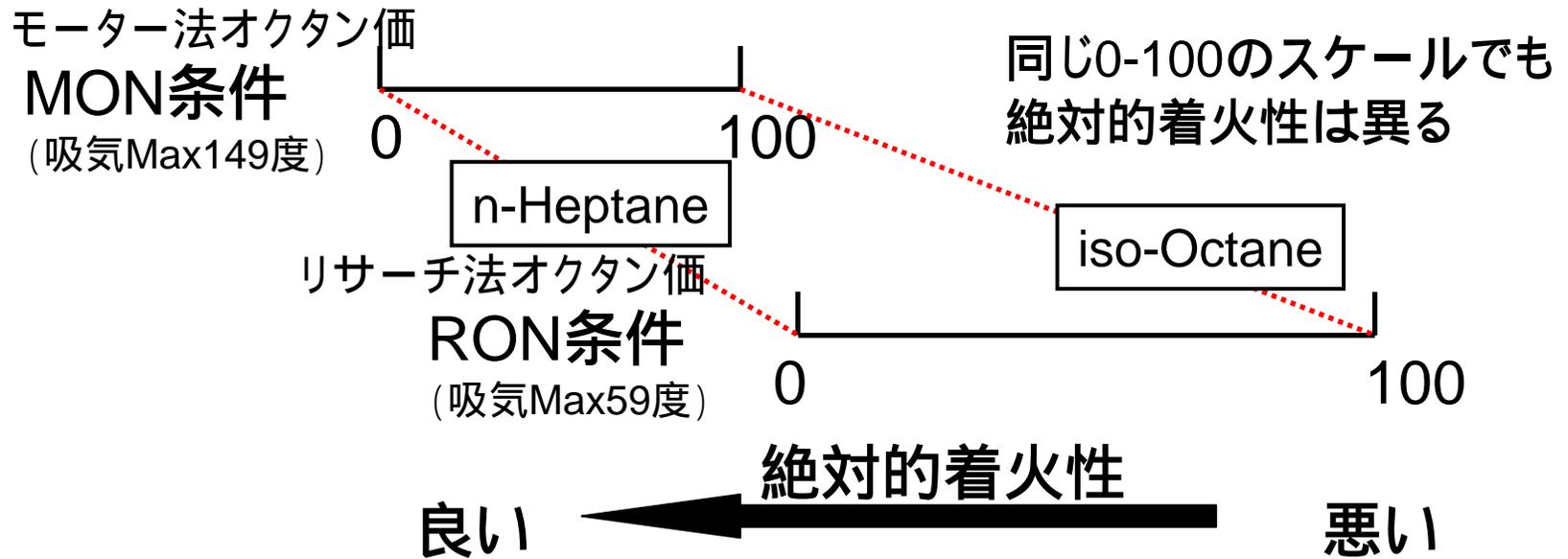
過給エンジン?

何れにしても着火条件によって  
炭化水素の着火性が異なることは  
当時から知られていた

# HCCIデータより計算されるオクタン価

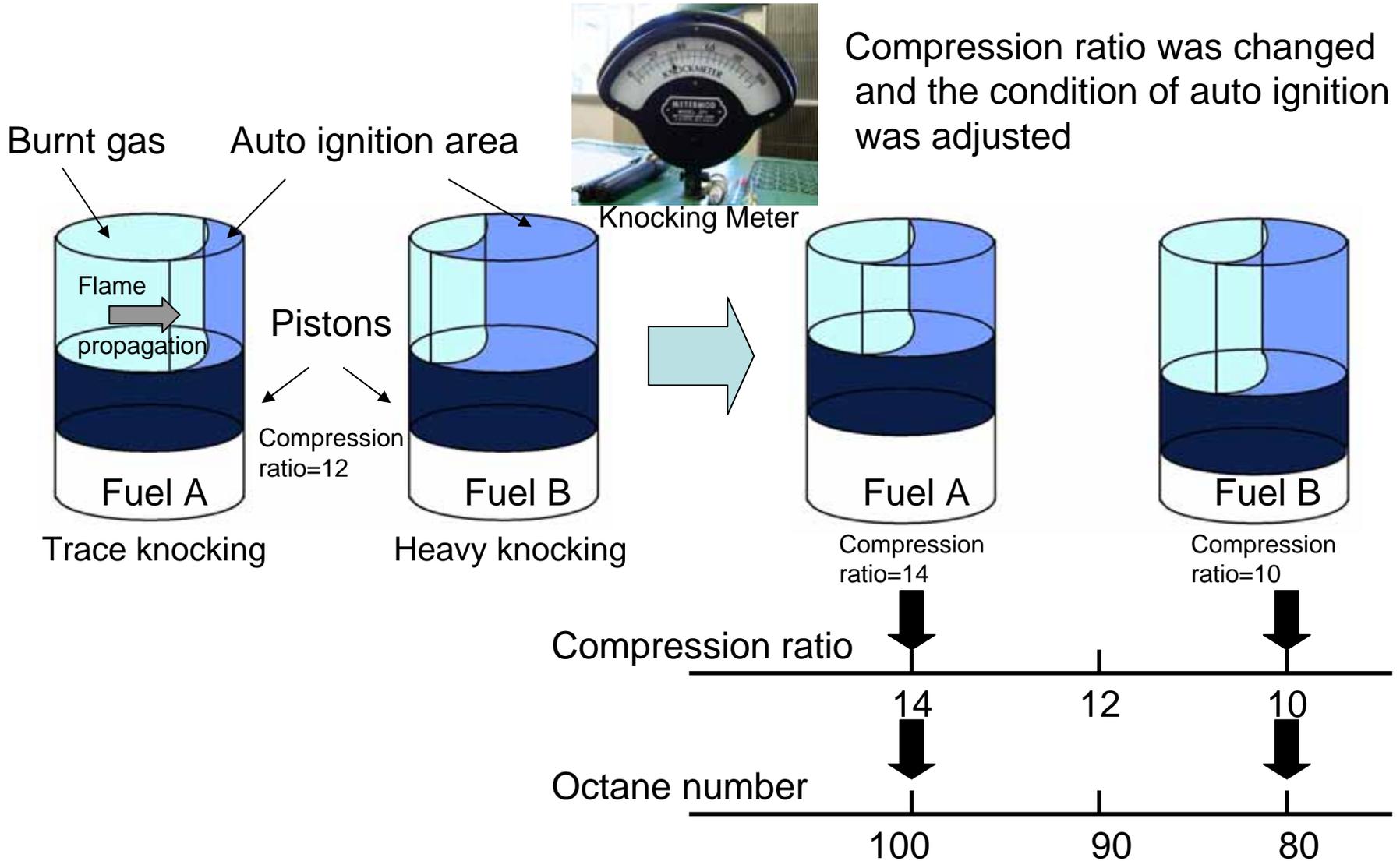
## < オクタン価の定義 >

炭化水素を或る条件で自己着火させた場合に…  
「ノルマルヘプタンの着火性を0、イソオクタンの着火性を100  
とした**相対的着火性**」

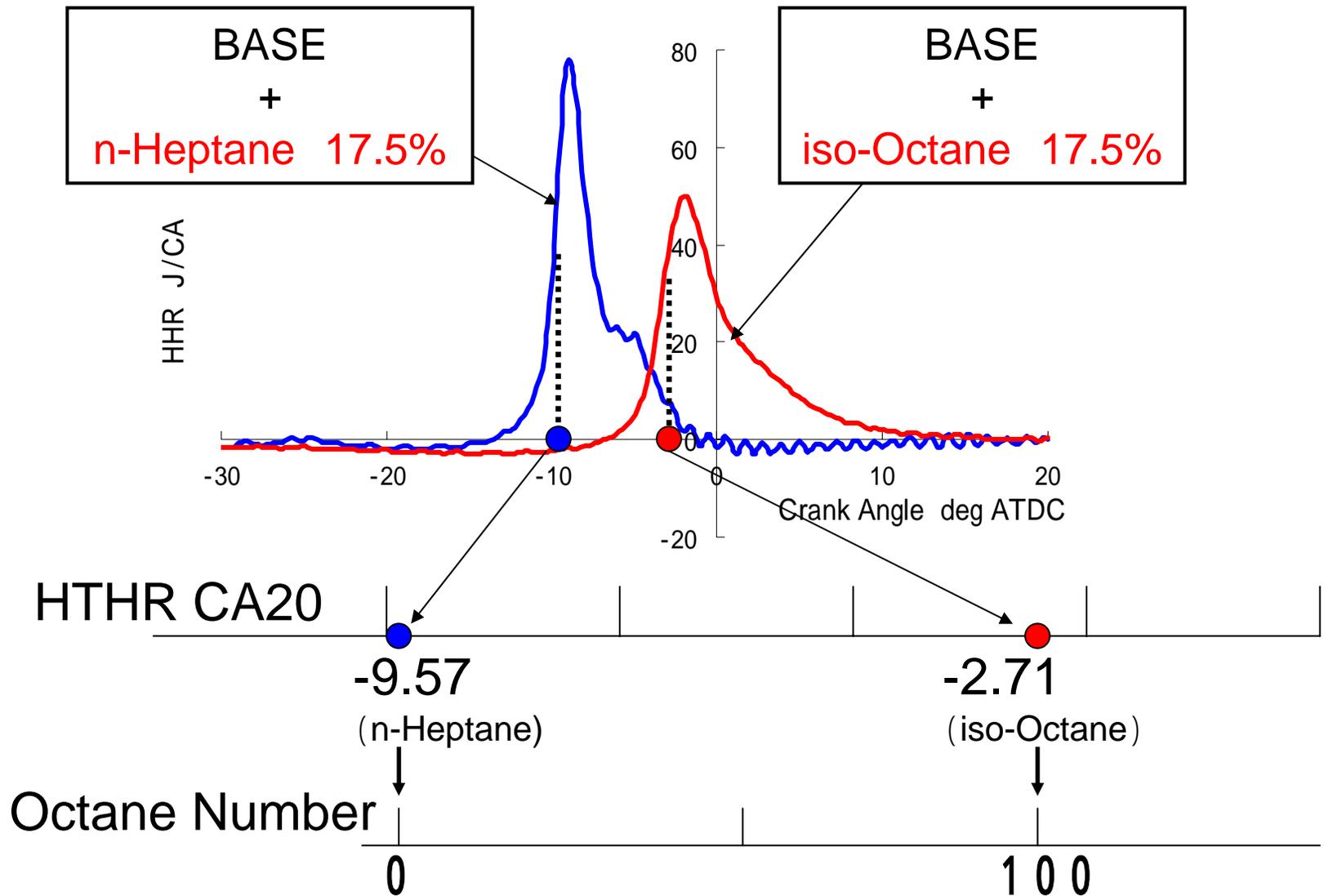


# CFRエンジンによるオクタン価の計測

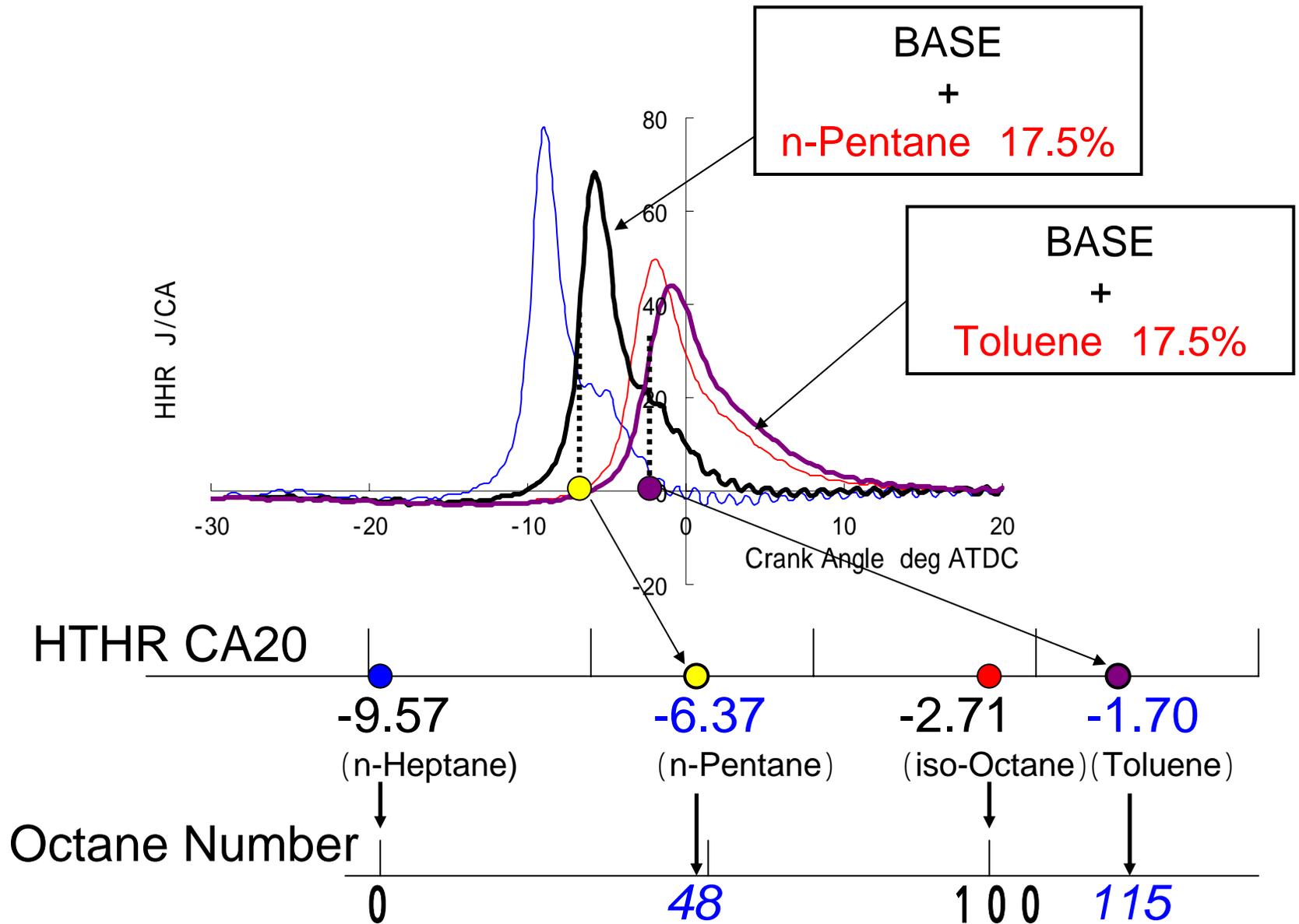
(Cooperative Fuel Research)



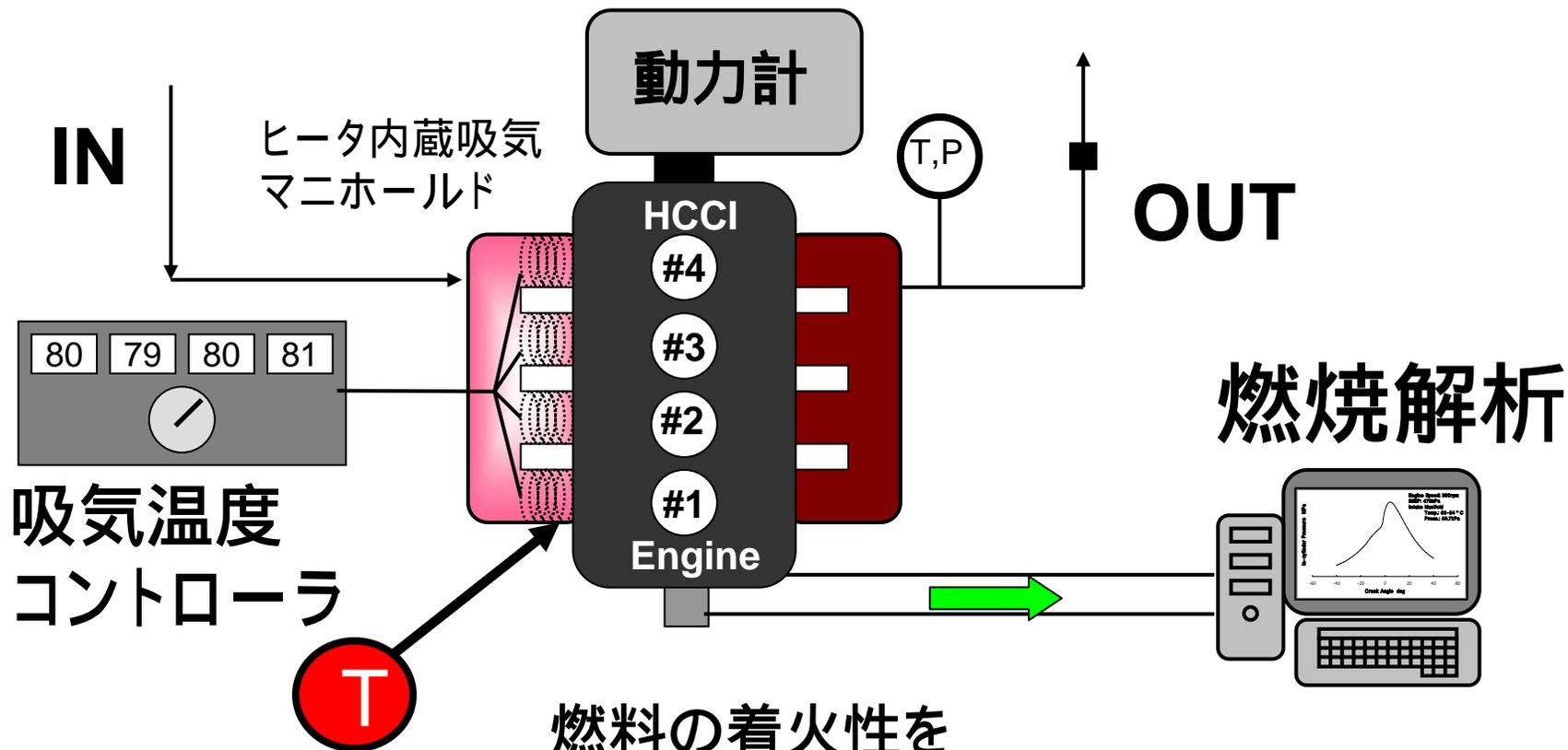
# HCCIエンジンより計測されるオクタン価



# HCCIエンジンより計測されるオクタン価



# HCCIエンジンセットアップ



燃料の着火性を  
変化させて…

- |     |             |
|-----|-------------|
| 50  | (Test set1) |
| 80  | (Test set2) |
| 100 | (Test set3) |
| 150 | (Test set4) |
| 180 | (Test set5) |

各条件において燃料を  
構成する炭化水素の  
オクタン価をHCCI燃焼  
データより計算した

# 試験方法・・・試験燃料(モデル燃料)

## MC系燃料

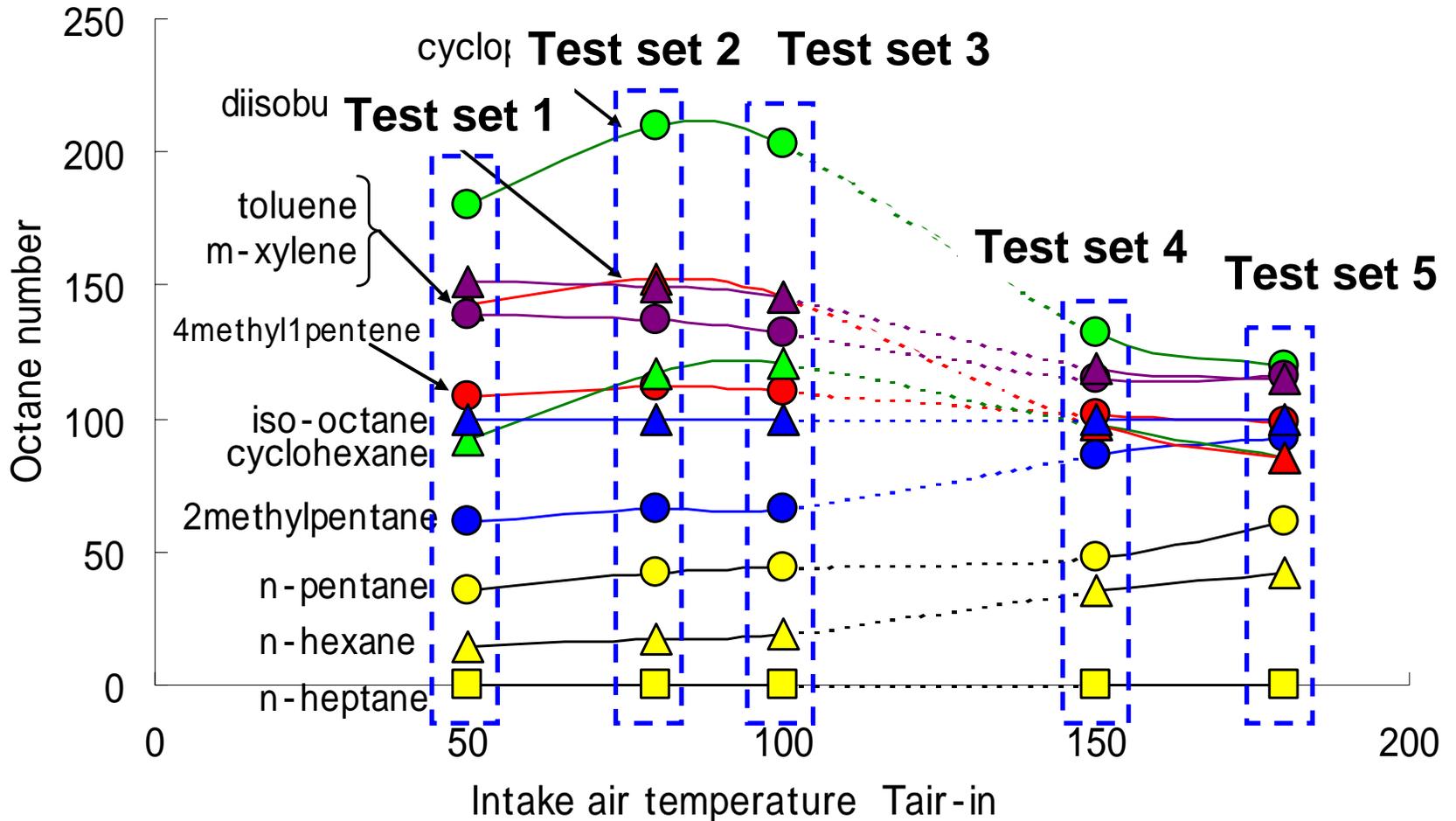
		BASE-1	MC01	MC02	MC03	MC04	MC05	MC06	MC07	MC08	MC09	MC10	MC11
Octane number	RON	87.6	85.8	90.2	88.4	86.6	84.2	87.4	83.0	90.4	88.8	89.0	89.6
Density	g/cm <sup>3</sup>	0.7281	0.7295	0.722	0.7244	0.7239	0.724	0.7314	0.7252	0.7276	0.7259	0.7366	0.7366
Reid vapour pressure	kPa	38.0	43.0	40.5	39.5	38.5	38.0	37.0	36.5	36.5	36.5	36.0	36.0
<b>Fuel composition</b>	vol%												
	n-Pentane	8.99	15.18	8.40	8.30	8.54	8.47	8.71	8.62	8.50	8.37	8.42	8.32
	Cyclopentane	8.75	8.26	14.54	8.07	8.29	8.16	8.38	8.28	8.26	8.11	8.19	8.07
	4-Methyl-1-pentene	8.99	8.51	8.40	14.88	8.49	8.43	8.56	8.56	8.48	8.39	8.40	8.37
	2-Methylpentane	9.11	8.62	8.71	8.44	14.88	8.62	8.66	8.60	8.58	8.46	8.50	8.48
	n-Hexane	9.27	8.73	8.63	8.62	8.92	15.17	8.74	8.73	8.71	8.66	8.66	8.66
	Cyclohexane	9.16	8.52	8.55	8.50	8.58	8.51	15.20	8.54	8.59	8.50	8.58	8.52
	n-Heptane	9.20	8.57	8.59	8.67	8.55	8.63	8.46	15.13	8.58	8.66	8.64	8.72
	Diisobutylene	8.94	8.29	8.37	8.44	8.27	8.36	8.18	8.27	14.71	8.40	8.38	8.46
	Isooctane	9.30	8.61	8.67	8.69	8.65	8.65	8.59	8.58	8.71	15.28	8.73	8.77
	Toluene	9.10	8.39	8.53	8.59	8.42	8.45	8.32	8.39	8.46	8.54	14.67	8.58
	m-Xylene	9.20	8.31	8.62	8.80	8.39	8.54	8.21	8.30	8.41	8.63	8.78	15.04
Remarks		version 5	BASE1+										

## K系燃料

		BASE-2	K01	K02	K03	K04	K05	K06	K07	K08	K09	K10	K11
Octane number	RON	87.3	82.0	93.8	88.5	85.5	76.3	86.5	73.8	94.8	88.3	92.0	93.0
Density	g/cm <sup>3</sup>	0.7281	0.7115	0.7315	0.7179	0.7166	0.7167	0.737	0.7207	0.7268	0.722	0.7529	0.7529
Reid vapour pressure	kPa	38.0	50.0	43.5	41.5	39.0	38.0	35.5	34.0	34.0	34.5	33.0	32.5
<b>Fuel composition</b>	vol%												
	n-Pentane	9.38	25.49	7.54	7.57	7.59	7.49	7.60	7.64	7.76	7.66	7.70	7.71
	Cyclopentane	9.03	7.30	24.36	7.31	7.32	7.27	7.35	7.37	7.44	7.38	7.43	7.47
	4-Methyl-1-pentene	9.26	7.46	7.49	25.37	7.46	7.45	7.59	7.54	7.70	7.56	7.60	7.61
	2-Methylpentane	9.27	7.51	8.11	7.54	24.75	7.77	7.64	7.58	7.68	7.65	7.64	7.65
	n-Hexane	9.42	7.66	7.70	7.68	8.30	25.37	7.80	7.71	7.80	7.71	7.79	7.79
	Cyclohexane	9.23	7.55	7.54	7.54	7.54	7.59	25.81	7.58	7.57	7.57	7.62	7.64
	n-Heptane	8.97	7.46	7.62	7.45	7.47	7.45	7.54	24.98	7.44	7.42	7.47	7.47
	Diisobutylene	8.72	7.23	7.30	7.24	7.27	7.24	7.31	7.27	24.44	7.22	7.28	7.25
	Isooctane	9.01	7.56	7.55	7.57	7.51	7.56	7.60	7.58	7.61	25.31	7.59	7.61
	Toluene	8.98	7.40	7.45	7.38	7.43	7.40	7.37	7.40	7.38	7.35	24.69	7.39
	m-Xylene	8.73	7.38	7.37	7.35	7.36	7.40	6.39	7.36	7.19	7.16	7.21	24.42
Remarks		version 6	BASE2+										

# 実験結果及び考察・・・HCCIエンジンより計測されるオクタン価

## HTHR CA20より計算



Q: RONやMONはこの図の中のどこに現れるのだろうか？

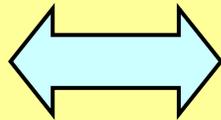
# 実験結果及び考察・・・RONやMONとは如何なる着火性の計測か？

Shell: オクタンインデックス (SAE2003-01-1816)

$$\text{Octane Index} = (1 - K) \times \text{RON} + K \times \text{MON}$$

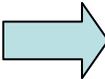
## 使い方

Octane Index

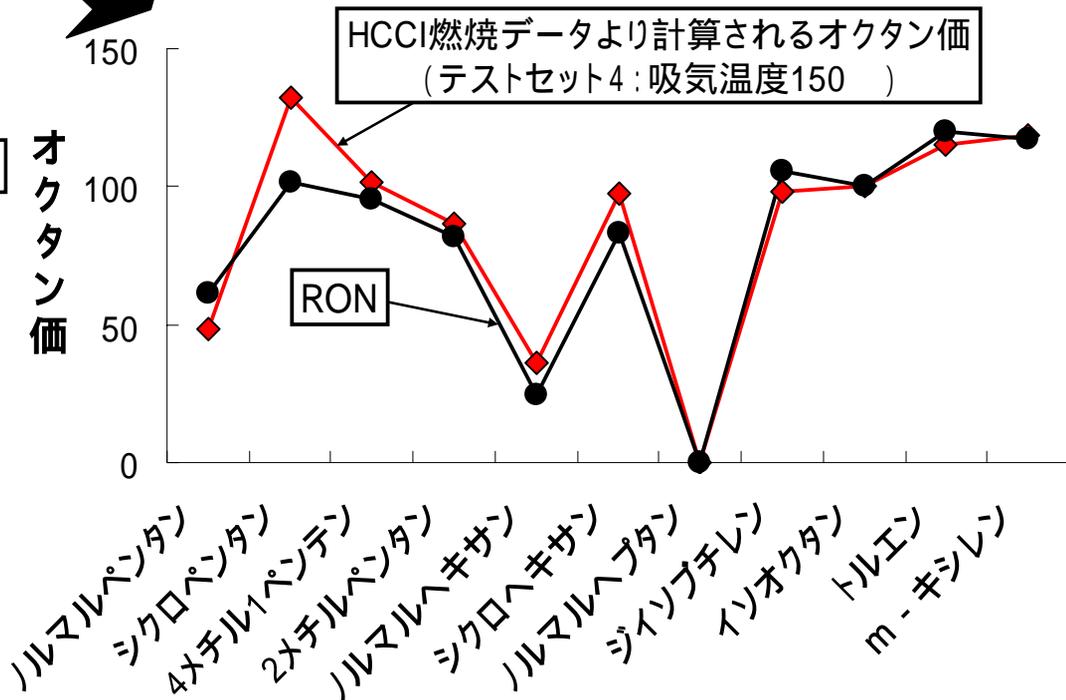
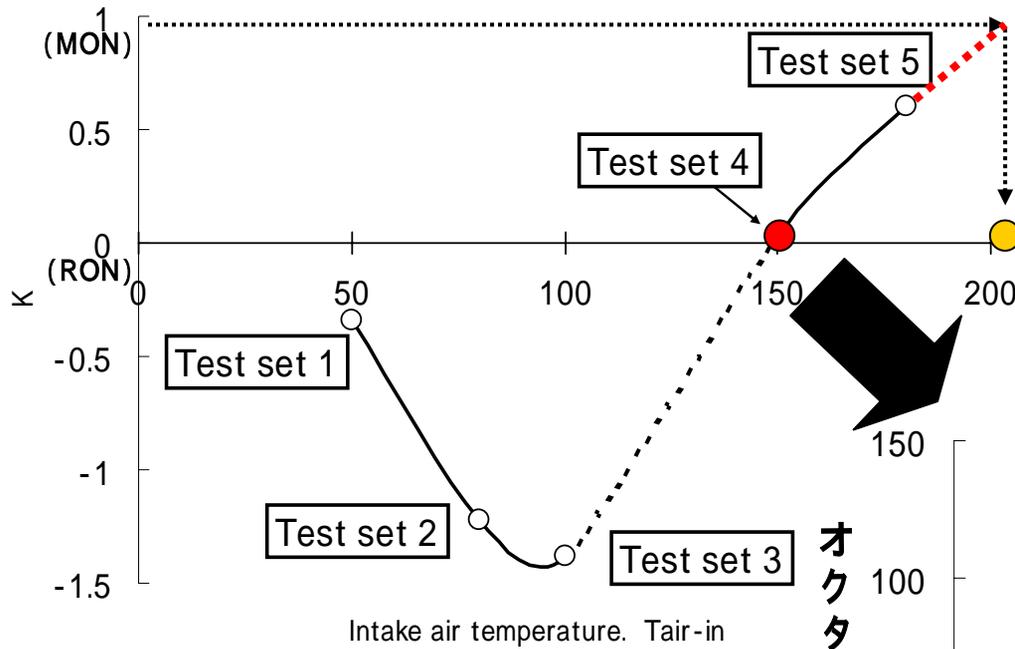


エンジンデータ  
例) HTHR CA20

相関が最も高くなるKの値を計算

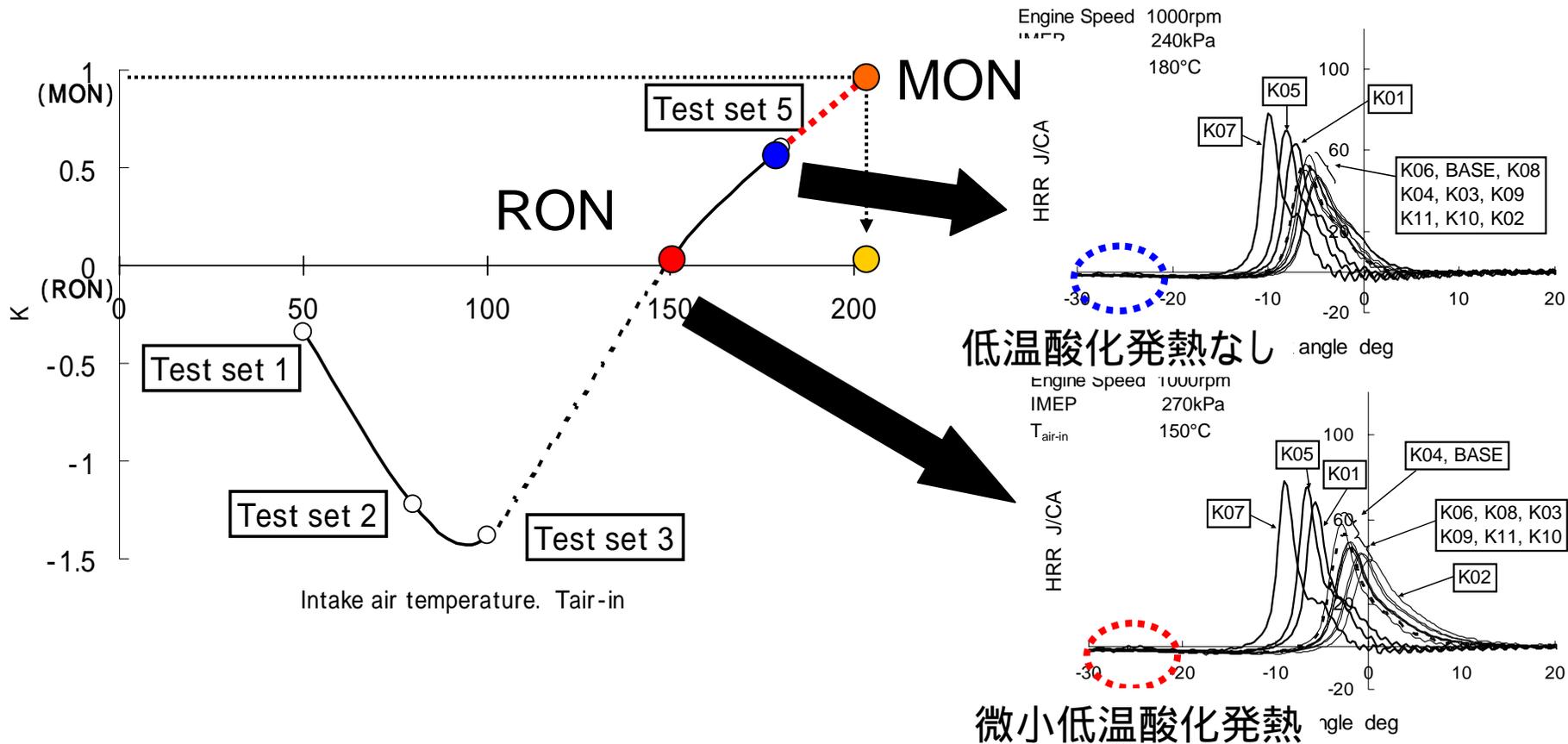
何を見ているのか？   $\left. \begin{array}{l} \text{RON的燃焼をしているのか？} \\ \text{MON的燃焼をしているのか？} \end{array} \right\}$  を調べている  
(K=0 RON、K=1 MON)

# 実験結果及び考察・・・RONやMONとは如何なる着火性の計測か？



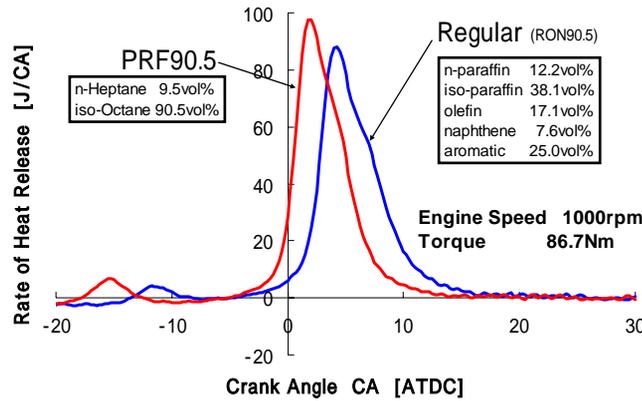
確かにテストセット4のHCCI  
燃焼データ(HTHR CA20)で  
計算されるオクタン価は、  
RONの値と一致する

# 実験結果及び考察・・・RONやMONとは如何なる着火性の計測か？

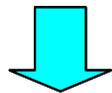


- ・リサーチ法オクタン価・・・ (RON) 微小低温酸化発熱が存在する系での高温酸化反応特性
- ・モーター法オクタン価・・・ (MON) 低温酸化発熱が存在しない系での高温酸化反応特性

# 正標準燃料とレギュラーの着火性



High  
↑  
Ignitability



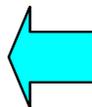
Low

PRF90.5

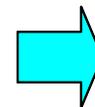
Regular

50°C

Low



$T_{\text{air-in}}$



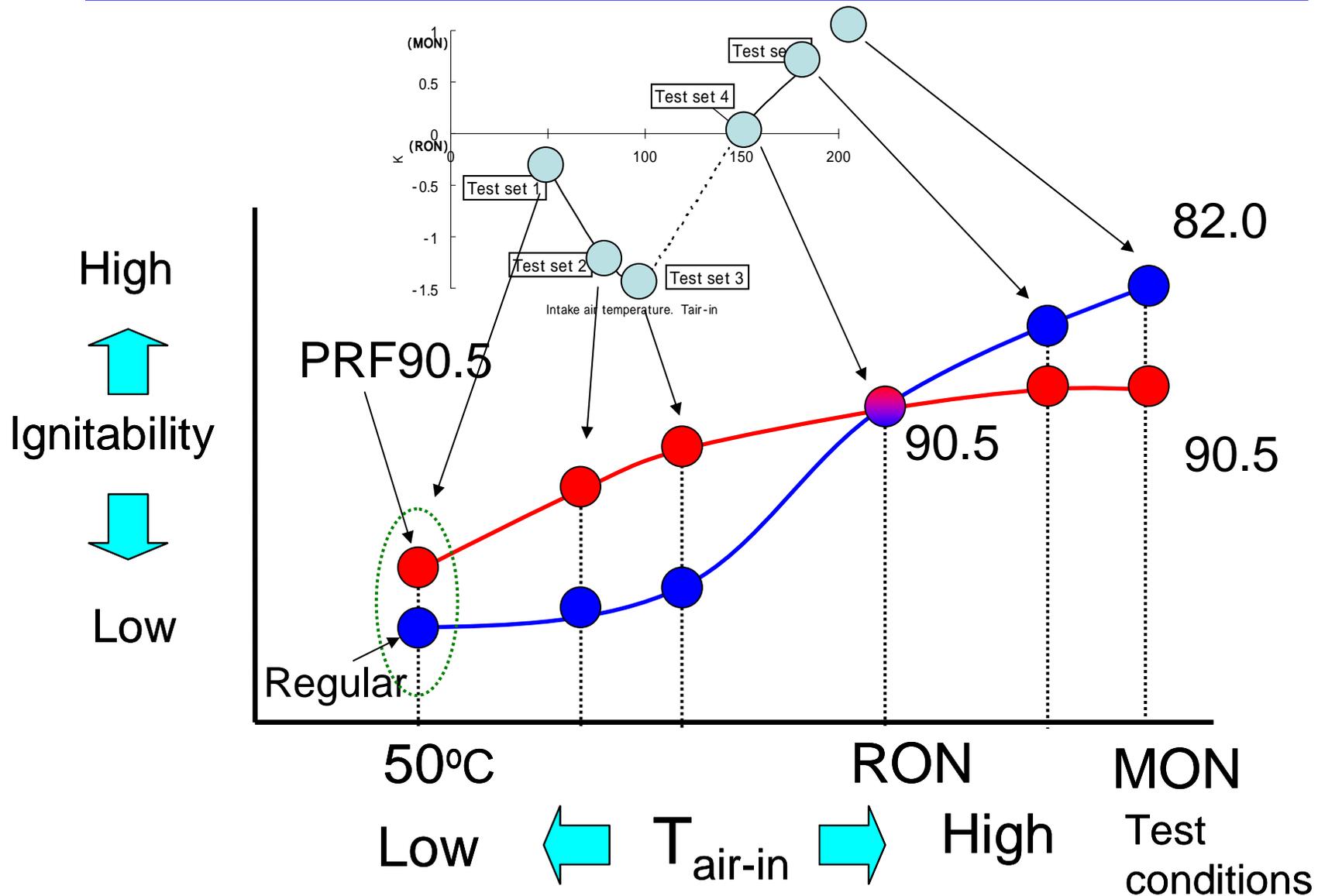
RON

High

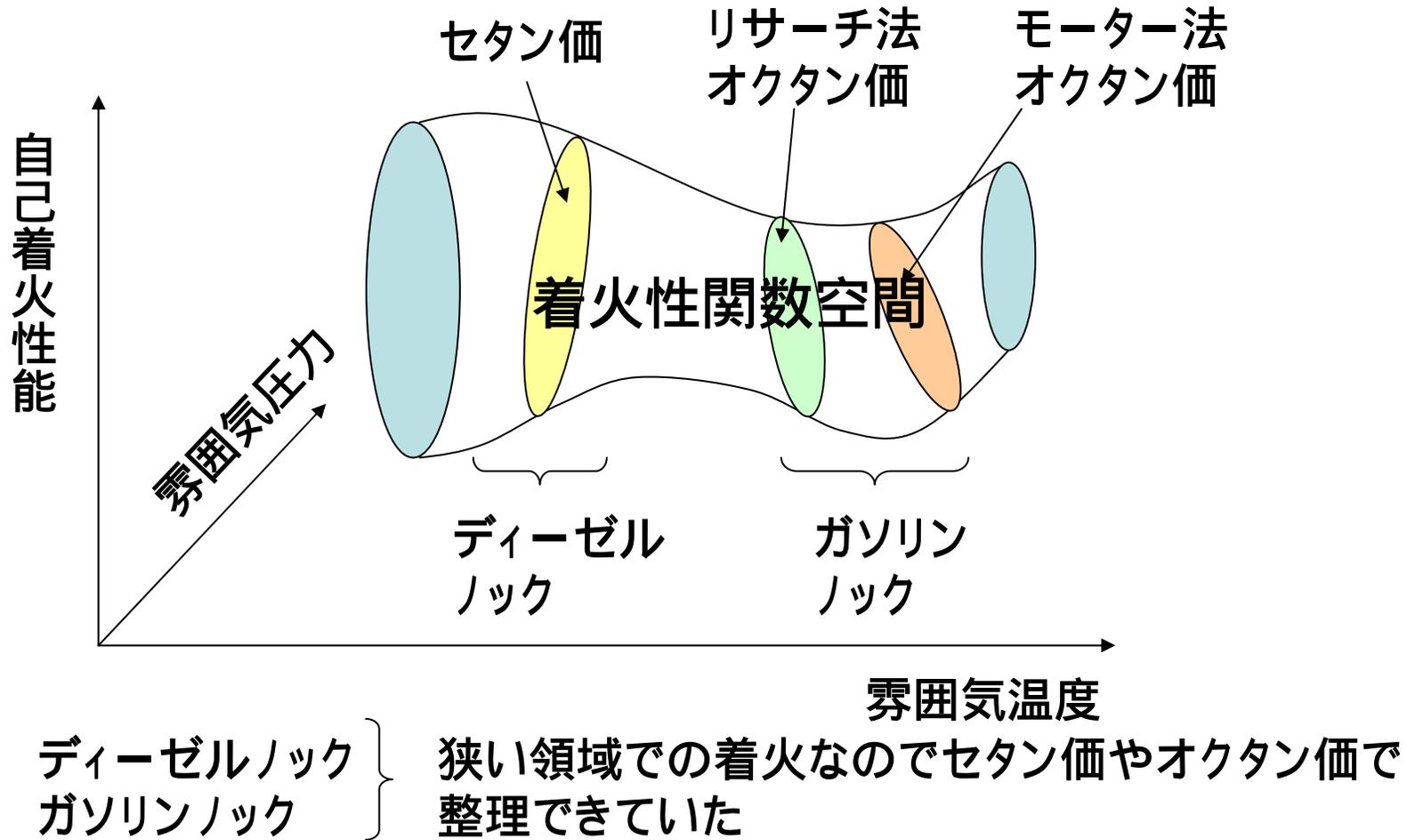
MON

Test conditions

# 正標準燃料とレギュラーの着火性



# 炭化水素の着火性指標のイメージ



HCCI燃焼領域

HCCI・・・全ての着火空間を表現しなければならない

## 第二章のまとめ

---

1. モーター法オクタン価とは低温酸化発熱が存在しない系における炭化水素の高温酸化反応特性である。
2. リサーチ法オクタン価とは微小低温酸化発熱が存在する系における炭化水素の高温酸化反応特性である。
3. レギュラーガソリンとPRF燃料の着火特性について明確にすることができた。