

高圧水駆動カッターに関する検証（第2報）

日比康友*, 後藤真也*, 鳥谷淳*

概 要

本検証は、総務省消防庁が所管する「消防防災科学技術研究推進制度」を活用し、民間企業¹⁾及び大学²⁾と共同で開発・検証したものである。

高圧水駆動カッターは、「消防ポンプ車等の送水圧力で駆動する新たな切断器具」として、「改良機」（前年度製作した試作機の改良型）により、その有効性を検証した。

その結果、①鋼板切断時に発生する火花抑制効果が大いこと、②駆動に使用する水は、消防ポンプ車の水タンクに戻して循環再利用も可能であること、③水中での切断も可能であること、④切断刃を交換することなく、様々な材質を切断できること等の有効性を確認した。

1 はじめに

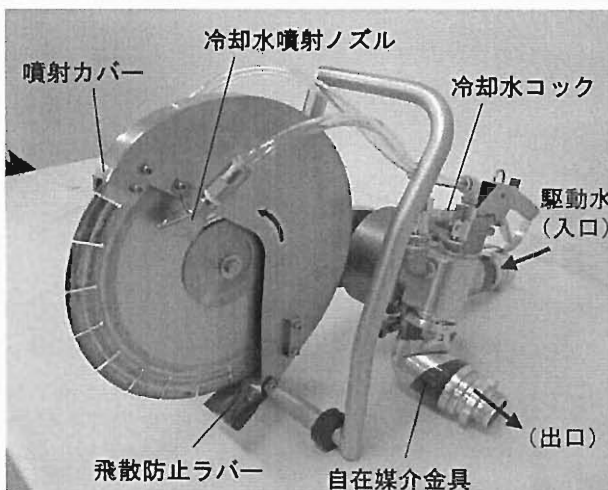
平成19年度「消防ポンプ車等の送水圧力で駆動する新たな切断器具」として、高圧水駆動カッターの試作機を製作し検証した。

その結果、エンジンカッターとほぼ同程度の切断性能を有するが、機器本体が重いため操作性が良くないこと、また、火花抑制能力を向上させたが、その抑制能力がどの程度あるのかを確認することが課題となった。

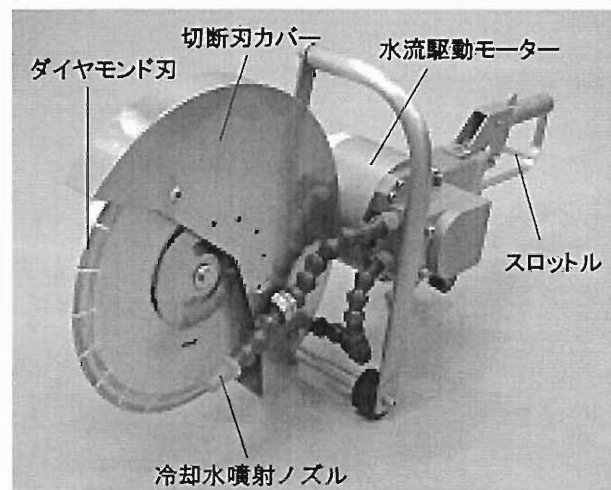
このことから、本検証では前年度の課題について改良・改善した「改良機」を製作し、その有効性を確認するための検証を実施した。

2 改良機の概要

平成19年度に製作した「試作機」及び平成20年度に製作した「改良機」について、外観比較を写真1、諸元性能比較を表1に示す。



改良機（平成20年度）



試作機（平成19年度）

写真1 外観比較

*消防技術課 1) 櫻護謨株式会社、株式会社スギノマシン 2) 首都大学東京

表 1 諸元性能比較

	改良機	試作機
駆動水圧	1.0~1.5 MPa	1.5 MPa
駆動水量	350~400 L/min (循環利用可能)	380 L/min (循環利用可能)
最高出力	4.1 kW (2,600 r/min)	3.4 kW (2,800 r/min)
最大トルク	20.5 N・m	18.0 N・m
切断刃	ダイヤモンド刃 (厚さ 2.7 mm)	ダイヤモンド刃 (厚さ 3~4 mm)
切断速度	44 mm/sec (鋼板 1.6 mm)	42 mm/sec (鋼板 1.6 mm)
本体重量	10.8 kgf	15.6 kgf
寸法	長さ 81×高さ 42×幅 21 cm	長さ 89×高さ 40×幅 24 cm

主な改良点は、次のとおりである。

(1) 水流駆動モーター性能の向上

消防ポンプ車から送水された駆動水が水流駆動モーターに入る流入口径を大きくし、駆動水量を増加させ、また、動力伝達部のギヤを改良して駆動伝達性能を向上させた。

(2) 軽量・コンパクト化

前年度の検証結果で、「機器本体が大きく、また、重いため操作性が悪い。」との課題を解消するため、機器本体の全長を約 8 cm 短く、また、水流駆動モーター周辺の部材、ダイヤモンド刃の基盤厚さ等をスリム化することで、約 5 kgf の軽量化を図った。

(3) 取り回し性の向上

前年度の検証結果で、「狭隘な活動スペースでは、駆動用ホースがあるため取り回し難い。」との課題を解消するため、自在媒介金具（半球状の範囲で自在に回転する構造）を本体に取り付けることで、取り回し性を向上させた。

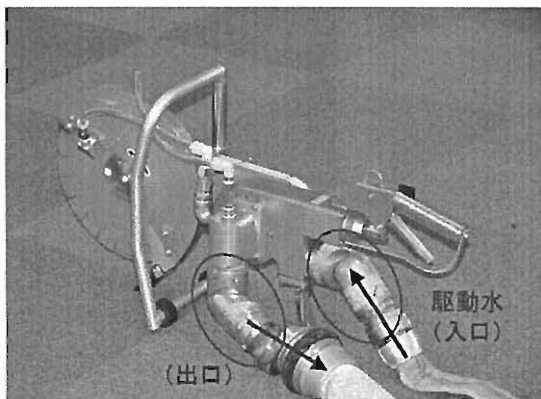


写真2 自在媒介金具

(4) 水中等での確実な駆動

平成 19 年度試作機の動力伝達部に使用していた「Vベルト」では、水に濡れると「滑り」現象があったことから、「歯付ベルト（通称、タイミングベルト）」に変更

し、水中で確実に駆動できる構造とした。

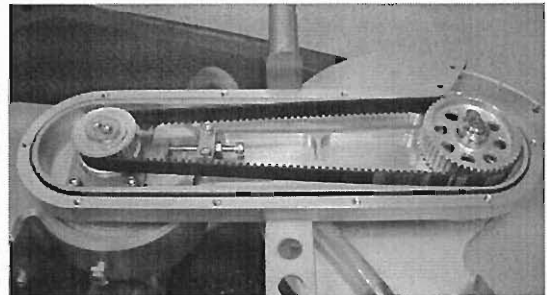


写真3 歯付ベルト

(5) 火花抑制能力の向上

前年度の検証結果で、鋼板切断時に発生する火花は、冷却水噴射により大幅に抑制できることを確認したが、更に火花抑制能力を高めるため、冷却水が切断面全体を覆うように噴射ノズル位置を変更した。

また、冷却水噴射ノズルから噴射された冷却水の一部は、ダイヤモンド刃の回転とともに切断刃カバー内部に巻き込まれた冷却水を再度、切断面上端付近に向けて噴射させるための「噴射カバー」と、火花飛散を防止するための「飛散防止ラバー」を新たに取り付け、火花抑制能力の向上を図った。

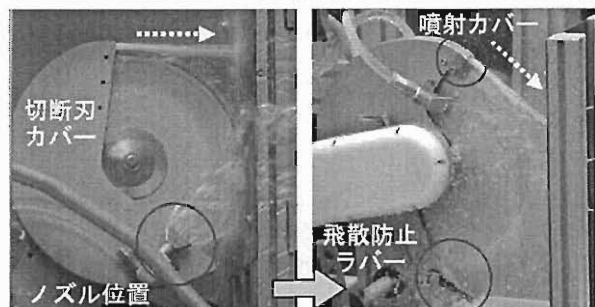


写真4 冷却水噴射ノズル

更に、冷却水を噴射させたくないような活動局面においても臨機応変に対応できるように「冷却水コック」を取り付け利便性の向上を図った。

3 検証内容

以上のように改良した改良機の効果を確認するため、次のような検証実験等を実施した。

(1) アンケート調査

前年度の試作機の課題であった軽量化及び取り回し性の向上を図った改良機について、その効果を確認するため、第六消防方面本部消防救助機動部隊に対して、写真5の操作実体験を実施し、同部隊の隊長隊員 47 名に対してアンケート調査を実施した。



木材切断

鋼板切断

写真5 操作実体験

(2) 火花飛散状況の確認実験

首都大学東京の敷地内において、鋼板切断時に発生する火花の飛散状況を確認するために実験を行った。

写真5の切断試験装置は、前年度検証（第1報）でも使用した装置で、固定した改良機に対して、切断材である鋼板（SS400、厚さ 1.6 mm）を矢印の方向に一定の力で押し付けて切断させる構造の装置である。

実験では、鋼板を切断した時の火花の飛散状況を確認するために、ハイスピードカメラ（1,000 コマ/秒）で動画撮影し、また、火花の形状等を確認するために水を張ったトレイで飛散する火花を収集し、顕微鏡（200倍）で観察した。

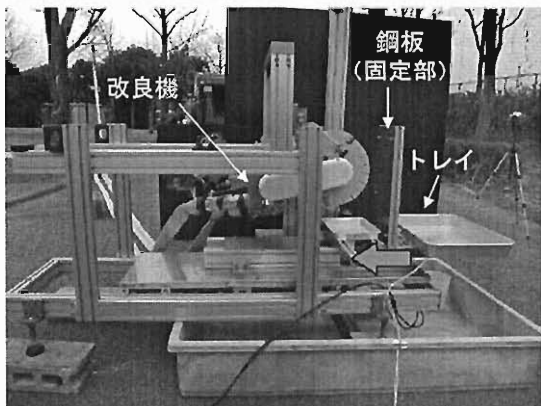


写真6 切断試験装置

(3) 爆発燃焼実験

消防技術安全所において、冷却水噴射による火花抑制効果を確認する爆発燃焼実験を実施した。

写真7の爆発燃焼実験装置は、写真6の切断試験装置を改造し、切断試験装置の鋼板固定部を爆鳴箱（縦 35×横 35×高さ 50 cm）に換えた装置である。

この爆鳴箱は、箱内部が視認できるように前面を透明アクリル板、上面を爆発燃焼時に吹き抜けるように透明ラップシートを張ったものとし、それ以外の面（切断面を含む）は、すべて鋼板で覆われている。

実験では、ガソリンの可燃性蒸気（爆発範囲内の蒸気濃度約 3%）を封入した鉄箱（切断面）を、各切断器具（改良機とエンジンカッター）で切断する実験を行い、その際の爆発燃焼状況を確認した。

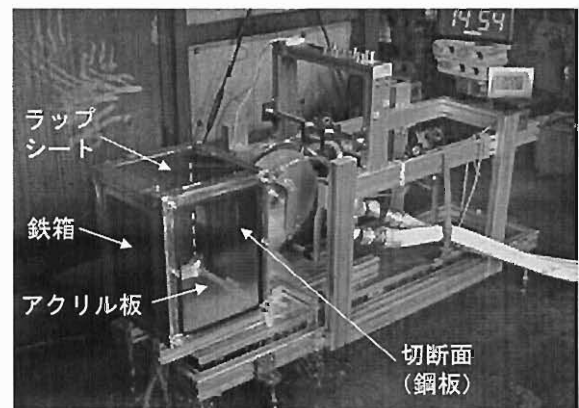


写真7 爆発燃焼実験装置

4 検証結果

前述3「検証内容」に基づく、結果を次に示す。

(1) アンケート結果

ア 機器本体の重さについて

「軽量・コンパクト化した改良効果が体感できたか。」の結果は、57%が「改良効果はまだ低く、体感できなかった。」との回答であったが、「この程度の重さならば操作性に支障はなく、改良効果を体感できた」との回答も 43%あり、一定の改良効果が見られた。

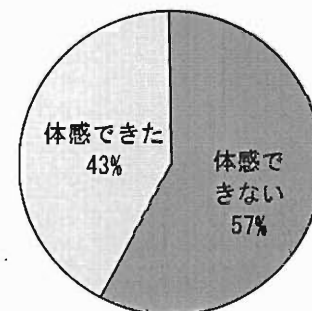


図1 操作性の改良効果について

イ 機器の取り回し性について

「自在媒介金具の採用により、取り回し性についての改良効果が体感できたか」の結果は、約9割が「取り回し性の向上が体感できた」との回答で、改良効果が大きく現れた。

また、「向上していない」とした主な理由は、「自在媒介金具の取付位置を機器本体の後部に変更すれば良くなる」との意見であった。

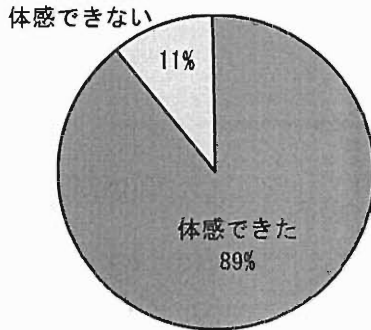


図2 取り回し性の改良効果について

ウ 考察

今回の改良機は、各種実験を行うための耐久性及び防錆を持たせるため、ステンレス製（一部チタン・アルミ製）仕様であり、今後は、アルミや樹脂等の材質への変更により軽量化する必要があることを確認した。

また、自在媒介金具を採用したことによる取り回し性の向上・効果が確認できたことから、今後は、取付位置を変更することも検討する。

以上のことから、改良したことによる操作性等に関する一定の効果が確認できた。

(2) 火花飛散状況の確認結果

ア 火花飛散状況について

写真8は、冷却水噴射の有無により、鋼板を切断した場合の火花発生状況をハイスピードカメラで撮影し、その火花発生量を比較したものである。

冷却水を噴射させた場合、噴射させない場合に比べ、発生する火花量は明らかに少ないことが確認できた。

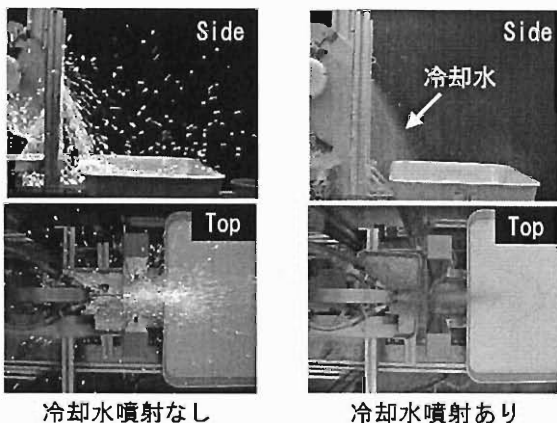


写真8 冷却水噴射有無による比較

イ 火花発生場所について

写真9は、鋼板を切断している裏側から撮影したもので、火花がどの部位から発生しているかを確認した。冷却水を噴射させない場合は、鋼板を切削している切断面の両端部は赤熱し、そこから多量の火花が発生している。

これに対し、冷却水を噴射させた場合は、切断面上端部に時折赤熱が見られ、そこから火花の飛散が散見されたが、下端部では赤熱は見られなかった。

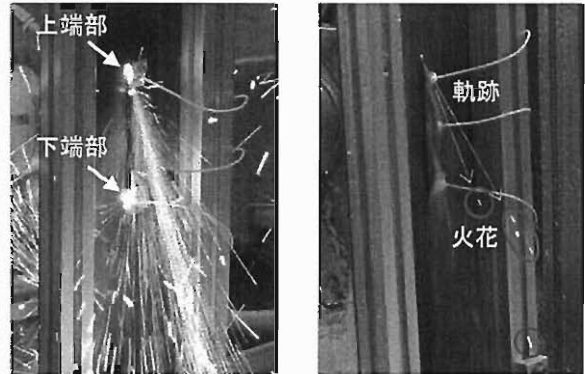


写真9 冷却水量による火花発生の変化

ウ 火花形状について

写真10は、改良機（ダイヤモンド刃）とエンジンカッター（レジン刃）で鋼板を切断した場合に発生した火花の形状を顕微鏡で比較したものである。

今回の実験ではすべての飛散火花を回収できなかったため一概には言えないが、次の傾向が見られた。

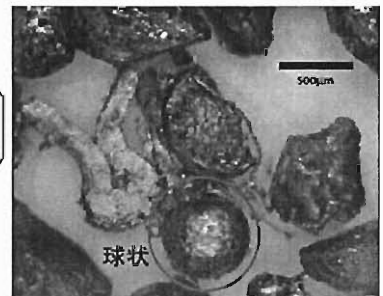
火花の形状を見ると、鉄（融点 1,535℃）が熔融した球状のもの、熔融温度に至らずに切削くず片の形状となったもの、ここでは高温である球状火花に着目し、切断条件により変化する球状火花の発生量と大きさを比較した。

球状火花の粒子径を見ると、エンジンカッターでは約 500 μm 程度、改良機（冷却水なし）では約 300 μm 程度、改良機（冷却水あり）では約 60 μm 程度と顕著な差が見られ、特に、冷却水「あり」と「なし」では大きく異なることが確認された。

球状火花の発生量を見ると、エンジンカッターでは非常に多く、改良機（冷却水あり）では、稀に見つけられる程度であった。

(写真内の黒色スケール：500 μm)

エンジンカッター
 (球状：多量
 大きさ：500 μm程度)



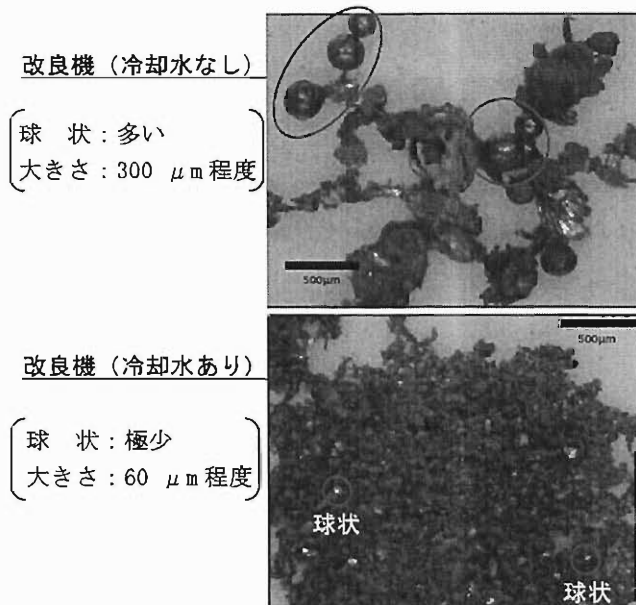


写真 10 球状火花の比較

エ 考察

発生する火花は、同じ鋼板を切断する場合でも各切断器具等によって、球状火花の量及び粒子径の大きさは違い、特に、改良機（冷却水あり）では、高温となって飛散する球状火花の発生量は極めて少なく、粒子径も小さいことがわかった。

この球状火花の発生量や粒子径の大きさが着火にどう影響しているのかについて考察する。

(7) 火花の着火現象

図3は、火花がガソリンの可燃性蒸気（爆発燃焼濃度内）環境下を通過する際に起こる着火現象³⁾を示したものである。

着火現象を起こす火花は、一般的に鉄が熔融した粒子であり、ここでは球状火花と考えてよく、着火現象ではこの球状火花条件（温度、速度、大きさ等）の他に、可燃性蒸気の周囲環境条件（温度、湿度、気圧等）により着火現象は大きく影響されることが知られている。

図中の球状火花は、可燃性蒸気内を通過すると、火花周囲が高温層となり、この層内のガソリン分子が活性化され燃焼が起こる。この燃焼の火炎が更に他のガソリン分子を活性化させることになり、この連続した火炎の伝播・拡大が爆発燃焼現象となる。

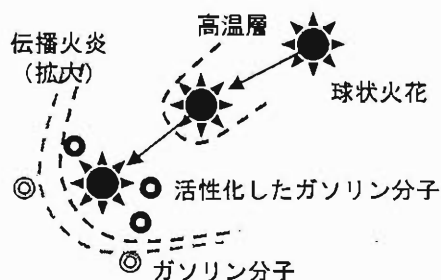


図3 球状火花による着火

以上のことから、球状火花が同じ温度（融点 1,535℃）で飛散していると仮定すれば、火花発生量が多く、粒子径が大きいほど着火しやすく、また、球状火花の速度が速い（可燃性蒸気の気体速度が速い場合も含む）ほど熱伝播しにくく着火もしにくくなる。

したがって、エンジンカッター等と比較して、改良機（冷却水あり）の冷却水噴射により、球状火花の発生量及び粒子径は大幅に抑えられていることから、火花抑制効果は高いと言える。

次に、球状火花がどのくらいの熱エネルギーを持っているのかを考察する。

(1) 火花の熱エネルギー

火花の熱エネルギーを計測する施設資器材がないため、次のような単純な概算値により考察した。

球状火花の持つエネルギーは、球状火花の温度（融点 1,535℃）、質量（球状体積）、鉄の比熱（0.435 J/g・K）、球状火花及び鉄の比重（7.86 g/cm³）で積算した。

表2 球状火花1個の熱エネルギー概算比較

切断器具別	粒子径	熱エネルギー
エンジンカッター	500 μm	343.33 mJ
改良機 (冷却水噴射なし)	300 μm	74.16 mJ
改良機 (冷却水噴射あり)	60 μm	0.59 mJ
ガソリンの 最小着火エネルギー※		0.25 mJ

※（参考）電気火花での着火エネルギーである。

ガソリンの最小着火エネルギーは、電気火花での着火計測値なので、今回の火花による着火とを単純比較できないので参考値として記載した。

この概算比較では、改良機（冷却水噴射あり）の球状火花1個あたりの熱エネルギーは0.59 mJであるのに対し、エンジンカッターでは343 mJ（約580倍）となった。

このことから考えても、改良機の冷却水噴射ノズルによる火花抑制効果は高いものと推定される。

そこで、次にこの火花抑制効果を確認するための検証実験について考察する。

(3) 爆発燃焼実験結果

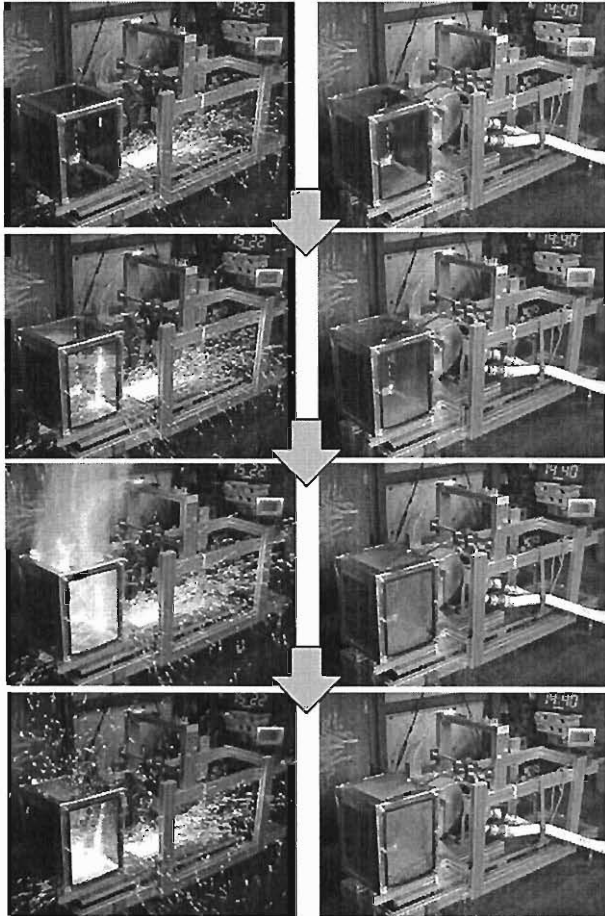
ア 実験結果

各切断器具（エンジンカッター及び改良機）ごとに3回づつ実施し、表3はその結果を、また、写真11は爆発燃焼状況の写真である。

その結果、改良機（冷却水噴射あり）では、3回中1回も爆発燃焼せず、改良機（冷却水噴射なし）では3回中1回、そしてエンジンカッターでは3回中3回とも爆発燃焼を確認した。

表3 爆発燃焼実験結果

切断器具別	爆発燃焼回数
改良機（冷却水噴射あり）	0回/3回中
改良機（冷却水噴射なし）	1回/3回中
エンジンカッター	3回/3回中



エンジンカッター
（レジノイド刃使用）

改良機（冷却水噴射あり）

写真11 爆発燃焼比較

イ 考察

火花の着火現象では、前述したとおり様々な諸条件が大きく影響するため、本実験結果をもって、可燃性蒸気環境下での活用可否について言及はできないが、冷却水噴射による一定の火花抑制効果は確認できた。

5 まとめ

今年度は、機器本体の軽量化等による操作性向上、また、冷却水噴射ノズル等の改良による火花抑制効果の向上を目指し製作した改良機について検証した結果、次のような一定の成果を確認した。

(1) 操作性の向上

改良機は、約 5 kgf の軽量化及び全長で約 8 cm のコンパクト化を図るとともに、自在媒介金具の採用などにより操作性に関しては一定の向上効果が確認できた。

また、更なる軽量化を望む声に対しては、機器本体の材質変更で対処できるものとする。

(2) 火花抑制効果の向上

火花を抑制する冷却水は、切断面全体を覆うようにノズル位置を変更、噴射カバーの新設等により、切断面両端の赤熱発生、着火を引き起こす球状火花の生成を大幅に抑制されることが確認できた。

更に、その抑制効果については、爆発燃焼実験により一定の火花抑制効果があることを確認できた。

以上のことから、改良機について一定の有効性が確認できた。

6 おわりに

高圧水駆動カッターに関する検証について、平成 19 年度の検証結果も併せて、その有効性をまとめると次のようになる。

(1) 火花発生を大幅に抑制

冷却水噴射ノズルにより、金属切断時に発生する火花を大幅に抑制する効果がある。

(2) 駆動水の再循環利用が可能

駆動水は、消防ポンプ車積載の水タンクや組立式簡易水槽等に戻して循環再利用することも可能である。



写真12 全体イメージ

高圧水駆動カッターは、①ホースで駆動し、使用した水は、②ホースで水タンク等へ戻して循環再利用することも可能である。

(3) 様々な環境下での活用が可能

酸欠や水中等、様々な活動環境下において活用できる。

(4) 様々な物が切断可能

金属をはじめ、鉄筋コンクリート、木材、樹脂、複合材等、切断刃を交換することなく多用途に切断できる。

謝辞

総務省消防庁が所管する「消防防災科学技術研究推進制度」を活用した産学官連携による本共同検証は、今回で終了となりますが、今日に至るまで様々な方々にご協力頂いたことに厚く御礼申し上げます。

【参考文献】

3) 平野敏右著：燃焼学，海文堂出版，2000年

Verification of the High-Pressure Water-Powered Cutter (Part 2)

Yasutomo HIBI*, Shinya GOTOU*, Sunao TORIYA*

Abstract

We developed and verified this equipment in cooperation with private companies and universities (Note 1) by utilizing the fire engineering research promotion program of the Fire and Disaster Management Agency.

We verified the effectiveness of the high-pressure water-powered cutter as a “new cutting device driven by the water pressure given by a pumper or the like” by using the improved prototype (i.e., the improvement of the production of the previous fiscal year).

As a result, we confirmed the cutter's effectiveness: (1) It is significantly effective in suppressing sparks that can occur during steel plate cutting. (2) The water used for driving the cutter can be returned to the tank of a pumper for recycling. (3) It can also be operated in water. (4) It can cut various materials without the replacement of cutting blades.