

爆発衝撃波中に現われた起電力

田 中 一 三*

1. まえがき

爆発の爆発に伴う電気的な現象には、未解決な部分が多い。例えば爆発の際に発生する電気擾乱(電波など)の問題は、H. Kolsky によつて、爆発生成ガスの電気分極によるとの仮説が出されたが¹⁾、分極の存在は、まだ実験的にたしかめられていない。爆発電波には、T. Takakura の観察したような Mc 以上の高周波成分と²⁾、H. Kolsky の述べている kc のオーダーの低周波成分とがあり、これらは別の機構により発生していると思われる。高周波成分は純粹の電磁波であろうが、低周波成分は、電磁誘導や静電誘導によるものがある。さらに M. A. Cook が述べているような³⁾、爆発生成ガスが接地端子に接触したときに大きなパルスが出る、という現象は、電気擾乱よりも直接的なイオン電流の測定に近い。実際には、アンテナまたはプローブの形状や位置によつて、これらの現象が混在することになり、実験結果の考察には慎重を要する。

筆者は先に、爆発の爆発によつて生ずる、衝撃波中の電気伝導度の測定を試み、その結果の一部を報告した⁴⁾。すなわち衝撃波の通路に一對の電極を置き、一定の電圧をかけておいて、衝撃波が通過する時に流れる電流を測定する。このとき電極にかかる電圧をいろいろに変え、その都度流れる電流を測定すれば、いわゆる Langmuir プローブ測定法と呼ばれるものになる。この方法は、ガス入り放電管などのような、平衡プラズマの研究に用いられるもので、爆発のような瞬間現象では、一発ごとに電圧を変えるような手段を取らねばならず、実験が面倒である。しかしこれを気体爆発において、G. B. Kistiakowsky 等が行ない、結局印加電圧の低いところで(-3~+1volt)、得られた電流波形に乱れがあり、良い結果が得られなかつたことを述べている⁵⁾。そしてこのことは、爆発衝撃波について行なつた上記筆者の実験でも、全く同じように起つた。

筆者はこの現象をさらに追及した結果、爆発衝撃波

の中に一對の電極を挿入した状態で、外部から何ら電圧を加えなくても、電極間をつなぐ外部回路に、自発電流が流れることを見出した。その際2本の電極位置は、波の進行方向に向つて、前後していることが必要である。

この現象は見かけ上は、H. Kolsky の述べた爆発生成ガスの電気分極に似ている。しかし実験の結果は、単純な分極の機構だけでは説明できない。そしてこの現象は、測定端子だけでなく、接地端子も衝撃波に接して初めて現われる点で、先に述べた M. A. Cook の観察とも関連している。

本報告では、以下この現象に関するいくつかの観察結果を述べ、最後にそれを、電離気体の持つプラズマ電位の考え方により、説明を試みた。

2. 装置と回路

実験に用いた爆薬は、すべてペンシリット導爆線である。長さ 5cm の導爆線を一端から起爆し、他端にはポリエチレンチューブ、または銅チューブをかぶせて、その中へ噴出する爆発ガスおよび衝撃波を、測定対象とする。この実験では、爆薬からの距離が近いところを考えているので、衝撃波と爆発生成ガスの分離は、完全に行なわれていない。以下簡単に、両者を含めて、爆発衝撃波と呼ぶ。

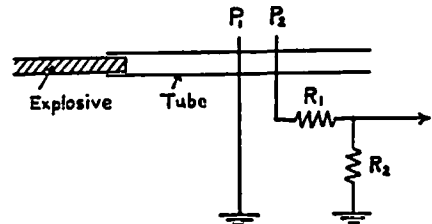


Fig. 1 Arrangement of experiments

測定回路は、大略 Fig. 1 のようである。図では爆発衝撃波の通路は、ポリエチレンチューブで、そこに電極として2本の鉄線が、波の進行方向にある距離をへだてて、挿入されている。チューブは内径 5mm のものを用い、鉄線は外径 0.7 mm である。

昭和42年1月24日受理
* 東京工業試験所第7部 平塚市新宿85

この場合、爆薬に近い電極 P_1 はそのまま接地され、遠い方の電極 P_2 に発生した電圧を、 R_1 と R_2 からなる分圧器を通して、オシロスコープで観測する。抵抗 R_2 は、この先オシロスコープまでつながれる同軸ケーブルの、特性インピーダンスに整合されている。大部分の実験では、 R_1 を 600Ω にとつた。なお以下本文に述べられた測定電圧値は、分圧以前の電極 P_2 における値に、換算したものである。

使用した同軸ケーブルは 5C-2V (特性インピーダンス 75Ω) で、波形記録のためのオシロスコープには、Tektronix 517A を用いた。掃引のためのトリガーは、爆薬中にイオンギャップを挿入する、通常の方法によつた。

3. 実験

Fig. 1 の実験配置で得られるオシログラムは、典型的には Fig. 2 のようになる。現象波形に先立つ微小振動 (a) は、爆発衝撃波の先端が、電極 P_1 に達したときに現われる。これはいつでも明瞭に現われるとは限らない。はつきり現われたもので見ると、振動の最初のふれは、後からくる現象波形と逆向きになっている。実際の現象波形 (b) は、衝撃波が電極 P_2 に到達して、初めて現われる。従つて (a), (b) の時間差と、電極間隔から、衝撃波速度を求めることも可能である。現象波形 (b) は、Fig. 1 の実験では、必ずプラス側に出ることは注意すべきである。

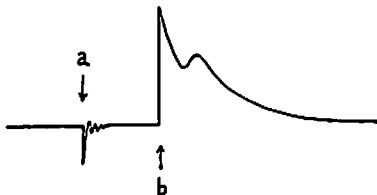


Fig. 2 Typical oscillogram

この波形は、電極間隔が 5mm 前後の時に、最も見易い。間隔をせまくすると、得られる波形も大きくなる傾向にあるが、あまりせまくすると、波形が乱れ、実験の再現性も悪くなる。2本の電極が、衝撃波面に平行に置かれ、波の進行方向への距離の差がないようにすると、この現象は現われなくなるはずである。しかし実際には、一方の電極がわずかでも前に出ているためか、大きく上下に振れた乱れた波形が得られる。このことが、低電圧での Langmuir プローブによる電流測定を、困難にする原因になつていると思われる。

Fig. 1 で、 P_1 と P_2 の回路への接続を逆にする。すなわち爆薬に近い電極 P_2 を接地し、近い電極 P_1 を R_1 に接続してみる。こうすると、得られた波形は

ただプラスマイナスが逆転するだけで、時間関係は全く同じである。近い電極 P_1 はそのまま測定端子につながれているが、ここへ衝撃波が達しただけでは現象波形は現われず、接地側の電極 P_2 に到達して初めて現われる。ただし波形はマイナス側に出る。このことから現象が誘導的なものではなく、直接に電極へ電流が流入して起るものであることが、明らかになる。

衝撃波に対する測定電極の前後位置と、得られる波形の正負については、さらに Fig. 3 のような実験を行なつた。ここではポリエチレンの代りに銅のパイプを用い、パイプ全体を接地側にとる。そしてパイプにあけた孔へ、絶縁した鉄線を挿入し、これを測定電極とする。このような実験配置では、得られた波形は、図の下に示すようなものになつた。この結果については後に考察する。

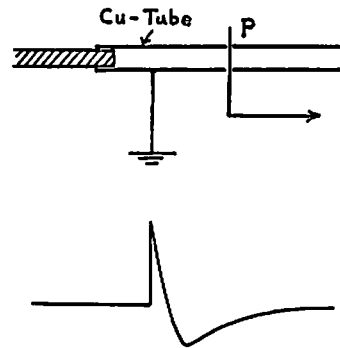


Fig. 3 Observation with a grounded tube

さて爆薬から放出される爆発衝撃波は、距離とともに減衰するはずであるが、ここに現われた現象波形も距離とともに変化する。Fig. 4 は、先に示した Fig. 1 の実験配置で、電極間隔を 4mm の一定にとり、爆薬端から電極 P_1 までの距離を、いろいろに変えて得られた波形である。縦軸は電極位置の電圧に換算して 2V/cm、横軸は図に示したように、距離とともに $1\mu\text{sec/cm}$ から $5\mu\text{sec/cm}$ の間で変化させてある。

この結果で気付くことは、波形の減衰が、波の幅の増大となつて表われている割合に、電圧の減衰はさほど大きくない。これは筆者が、同じ条件で衝撃波中の電気伝導度を測定したときにも、見られた傾向である。衝撃波はチューブの中の一次元伝播であるから、速度の減衰もさほど大きくはなく、距離が 1, 2, 4 および 8cm の各点において、それぞれ 6.0, 5.2, 4.0 および $3.2\text{ mm}/\mu\text{sec}$ と測定されている。

Fig. 4 で興味のあることは、現象波形の中に 2 個のピークが見られ、その間隔が距離とともに広がっていることである。伝播速度からピーク間隔を長さに変換

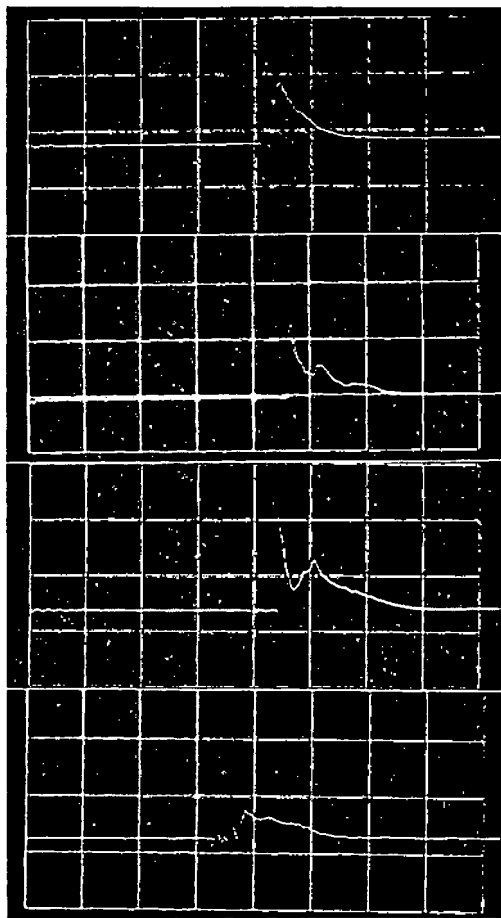


Fig. 4 Changes of wave form. The separation between two electrodes of each probe is 4 mm. Distances from the explosive end to the probe are 1, 2, 4 and 8 cm, and time scales are 1, 1, 2 and 5 $\mu\text{sec}/\text{cm}$, upper to lower, respectively.

算すると、距離 1cm のところでの 1.2mm が、距離 4cm では約 5mm まで伸びている。最初のピークが衝撃波面で、第 2 のピークが爆発ガスの流れとも考えられるが、このピーク間隔には、再現性の点で満足できぬところがある。最初の Fig. 2 にも模式的に示したように、この現象波形は 2 個のピークを持つものが多い。これは前述の、電気伝導度測定には現われなかつたもので、電極間隔が前後にずれていることの影響かもしれない。

この現象は、爆発衝撃波中の電離ガス、すなわちプラズマが、何らかの原因で起電力を持ち、2本の電極はその外部端子になっている、と見ることも可能である。そのとき、プラズマの作る電源は、定電圧源かそ

Table 1 Peak voltage and current observed on oscillogram

Probes		Load Resistance (Ω)	Peak Voltage (V)	Peak Current (mA)
Distance* (cm)	Separation (mm)			
1	5	75	0.425	5.7
"	"	140	0.51	3.6
"	"	300	1.19	4.0
2	4	75	0.255	3.4
"	"	190	0.65	3.4
"	"	675	3.0	4.4
"	"	3,600	2.9	0.8

* From the explosive end to the first probe.

れとも定電流源だろうか、という問題が起ってくる。定電圧源のとき、外部抵抗を変えれば、電流が変わるだけで電圧は変わらない。逆に定電流源のときは、電流が一定だから、外部抵抗とともに端子電圧が変化する。

これを検討するため、Fig. 1 の回路で、負荷抵抗にあたる $R_1 + R_2$ を変えて、測定を行なつてみた。その結果は Table 1 のようになる。二つの条件での測定であるが、測定されたピーク電圧から、電流に換算してみると、どちらもほぼ定電流源に近いことがわかる。しかしあまり抵抗を大きくすると、合わなくなる。

ピーク電圧値は、電極の有効面積に関係する。すなわち電極の一部を絶縁材料で被覆すると、現象波形は小さくなる。そして波の高さは、ほぼ電極の露出面積に比例する。この場合、2本の電極のうち、面積の小さい方によつて支配される。従つてこの現象には、電極表面に衝突する、イオンや電子の効果と結び付けて考える必要がありそうである。

電極を衝撃波の通路でなしに、直接爆薬の中へ挿入し、同じように実験すると、得られる波形は、ほとんど見られないくらいに、小さくなつてしまう。

4. 考察

現象の本質を誤らないために、二、三のチェック実験を行なつた。まず外壁のポリエチレンの影響を考え、これを銅パイプに変え、絶縁した2本の電極を挿入してみたが、得られた結果はほとんど同じであつた。次に電極金属の熱起電力などの効果をみて、鉄以外の金属も用いたが、結果は全く変らなかつた。また衝撃波以外の影響を見るため、波の通路の電極表面を被覆してみると、波形が消えることから、明らかに衝撃波や爆発ガスのみから来る現象であることを確めた。

さてこの現象を説明するための、最も素朴な模型は、Fig. 5 のように、爆発衝撃波(生成ガスも含めて)が進行方向に向つて、プラスとマイナスに分極し

ているとみなす考え方である。分極といつても、例えば誘電体におけるピエゾ電気のような、表面的なものではなく、ここから電流が取り出させるような、一種の起電力を持ったものでなくてはならない。これは電極間に500pFのコンデンサーを入れた実験で、波形が変わらないことから確められた。発生機構は別にして、一応このような模型を仮定すれば、電極の入れ替えによつて、波形の符号が逆転することなどは、説明付けられる。

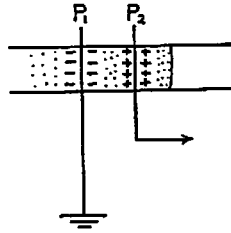


Fig. 5
Polarization of ionized gas in preceding shock wave

細かく考えると、Fig. 5で2本の電極間電位差がFig. 2の現象波形のような変化をするためには、分極が単なる二重層ではなく、波面の後方ほど電位の下るような、電位勾配として存在していなくてはならない。衝撃波中に電位勾配があり、挿入された電極位置の間の電位差を測定していると考え、Fig. 3の現象もうまく説明できる。このとき接地側の電極は、衝撃波全体の平均電位を与えらると思われるので、測定電極の電位が、最初のプラスから途中でゼロを経て、マイナスに変わることも理解できる。最後にまたゼロに戻るのには、電位勾配とは別に、爆発ガスが電流を通さなくなつたのだと考えればよい。従つてこの模型を使えば、うまく現象波形が説明できるのであるが、何故に衝撃波中にこのような電位勾配ができるのかは、別の説明を必要とする。それとこのような単純な勾配構造だけでは、電極間隔のせまい方が波形の大きくなることは、うまく説明できない。

起電力の原因としては、次に述べるプラズマ電位の概念が、一つの手がかりを提供する。

Fig. 6は、電離した気体、すなわちプラズマに関するLangmuirプローブ測定である。図では放電管中のプラズマを例にとつているが、プラズマ中に電極(プローブ)Pを挿入し、それに可変電圧Vをかけて、流れる電流Iを測定するものである。得られる電流と電圧の関係曲線は、Fig. 7のようになるが、これからイオンや電子の密度、温度などが得られる。

Fig. 7で、プローブに電流が流れないときの電圧を V_0 とすると、これは絶縁された器壁の電位に等しい。これより高い電位では、プローブに電子が流れ込み、図のプラス方向の電流が流れる。この電流は電圧とともに増加するが、ある電圧 V_1 で飽和する。この

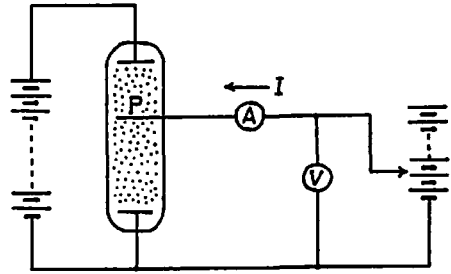


Fig. 6 Langmuir probe measurement

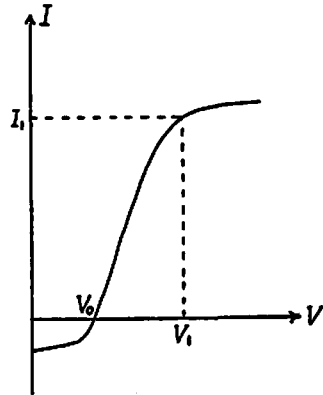


Fig. 7 Characteristics curve on Langmuir probe

電圧はプラズマ電位と呼ばれている。

プラズマ電位の存在は、定性的には、次のように理解できる。プラズマ中にプローブを挿入したとき、プローブがプラズマと同電位にあれば、プローブには電子も陽イオンも自由に衝突することができる。プラズマ中では、電子と陽イオンの密度は等しいが、運動速度は電子の方がはるかに速いため、電子が余計に衝突する。従つてプローブには、電子電流 I_1 が流れることになる。このことから、プローブに電流を流さないためには、プローブをプラズマの電位より低くしなければならぬ。そのときプローブは、プラズマに対してマイナスの電位を持ち、衝突しようとする電子を追い返す。

プラズマ電位は、 V_1 と V_0 との差によつて、 $\phi = V_1 - V_0$ で定義され、理論的には、次式のように計算される⁶⁾。

$$\phi \equiv V_1 - V_0 = \frac{kT_e}{2e} \ln \frac{M_p}{m} \frac{T_e}{T_p} \quad (1)$$

ここに M_p 、 m は、陽イオンおよび電子の質量、 T_p 、 T_e は、陽イオンと電子の温度、 k はボルツマン定数、そして e は電子の荷電である。

本実験で観察しているものを、空気中衝撃波のプラズマと考えて、そのプラズマ電位を計算してみる。初期圧力1気圧で、速度約15マッハの空気中衝撃波では、平衡状態の温度は約7,000°Kである⁷⁾。電子温度はこれより高いと思われるが、簡単のために、 $T_p = T_e = 7,000^\circ\text{K}$ とする。そして陽イオンは、すべて最も電離しやすいNO分子から成ると仮定する。このとき(1)式からプラズマ電位は、3.28 voltと計算される。

プラズマの電位を考慮すると、現象の次のような解釈が可能である。衝撃波が一方の電極 P_1 を越えたときには、まだ電流が流れないから、プラズマはプラズマ電位 V_1 にあつても、電極の電位は V_0 である。次に衝撃波が、他方の電極 P_2 に達すると、このときには自由に電流が流れうるから、 P_2 の電位は V_0 から V_1 まで、 $V_1 - V_0 = \phi$ だけはね上る。また Fig. 2 に示した、現象に先立つ微小振動は、衝撃波が P_1 に達したとき、僅かなキャパシティを満たすために流れ込んだ電流によるものと考えられる。プラズマがプラスの電位を持っていることは、微小振動の最初のふれがマイナスになることを説明する。

上に述べた機構では、実際に測定される電圧は、外部抵抗に流れる電流と、それによる端子電圧が、Fig. 6 のプラズマの $I-V$ 曲線为满足するような値に落ち着くはずである。従つてその電圧値は、プラズマ電位 ϕ より低くなり、 ϕ を上限とすることになる。

前に述べた測定電圧は、以上のプラズマ電位による発電機構と矛盾しない。しかしこの考え方では、説明できないことが二三ある。第一は、Table 1 に示したように、現象がある範囲の外部抵抗に対しては、ほぼ定電流源的な性格を持つこと。第二は、測定される電流値が、プラズマ機構から計算される値に比して、はるかに小さいことである。Fig. 6 において、電圧 V が V_0 と V_1 の間にあるとき、流れる電流 I は

$$I = Ne\gamma \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m}} S \exp\left(-\frac{V_1 - V}{kT_e}\right) \quad (2)$$

で与えられる⁹⁾。ここには N は電子密度、 S は電極の有効面積である。上式の計算には、電子密度その他を仮定しなければならぬが、実験条件から考えて、妥当と思われる数値を用いても、計算値は測定値より2~3桁大きく出てしまう。

測定値が電極の有効面積に比例することは、実験結果にも明らかな傾向が見られ、その点からも電極への

電子やイオンの流入という機構が、この現象の本質をなしているようにみえる。Langmuir プローブの理論は、せいぜい1気圧以下の低圧プラズマに関するものであるから、これを高圧の衝撃波に適用するときには、いくらか修正を必要とするのかもしれない。実験結果の最後に述べたように、電極を爆轟する爆薬中に挿入した場合、波形が非常に小さくなってしまうのは、高圧プラズマの異常性を示すものとも考えられる。高圧プラズマの理論は、実験の困難さもあつて、まだ未解決の部分が多い。

5. まとめ

爆発する爆薬から、一次的に噴出する衝撃波および爆発生成ガス中の電離気体に、Langmuir プローブ測定を適用しようとするとき、印加電圧の低いところで、測定波形が乱れてしまう。その原因を追及した結果、この種電離プラズマの中には、一種の起電力があることを見出した。現象は衝撃波の通路に、波の進行方向に僅かな距離をへだてて2本の電極を置けば、その間に発生する電位差として観察される。典型的な波形は、本文 Fig. 2 のようなものである。

この起電力は、電極間につなぐ外部抵抗が 75Ω から 700Ω の範囲で、ほぼ定電流源的な性格を持つている。また波形の大きさが、電極の有効面積によるので、現象の本質は、電離気体からの電子やイオンの流入に関するものと思われる。筆者はこれに、プラズマ電位の概念を用いた定性的な説明を試みた。

文 献

- 1) H. Kolsky: Nature, 173, 77 (1953)
- 2) T. Takakura: Pub. astro. Soc. Japan, 7, 210 (1955)
- 3) M. A. Cook: "The Science of High Explosives", Chap. 7, Reinhold Co., New York (1963)
- 4) 田中一三: 東工試報告, 61, 100 (1956)
- 5) C. W. Hand and G. B. Kistiakowsky: J. chem. Phys., 37, 1239 (1962)
- 6) 例えば
小島昌治: "電子管の基礎", 岩波講座, 現代物理学
- 7) A. Ferri "Fundamental Data Obtained from Shock-Tube Experiments", p. 228, Pergamon Press (1961)
- 8) 例えば
一宮, 土手: 応用物理, 35, 294 (1956)

Electro-motive Force Observed in Explosive Shock Waves

by Kazumi Tanaka

When the Langmuir probe method is applied to the ionized gas in explosive shock waves, some unknown effects disturb the measurement especially in the region of lower applied voltage. Investigating the effects, the author found a kind of electro-motive force appeared on a probe set in the path of the shock waves. He could see the electric current through a load resistance connected between two electrodes of the probe, which were set few millimeters apart in the direction of the shock wave propagation. Typical wave form observed on an oscilloscope showed a fast rise up and following exponential decay.

This e. m. f. showed a character of roughly constant current source in the region of 75 to 700Ω of load resistance. Because the intensity of the derived current depended on the effective surface area of the probes, it seemed the phenomenon came from the collisions of ionized particles on the probes. The author attempted to explain the observed phenomena with the concept of plasma's potential and its related properties.

コバルト錯塩の爆発性

水島容二郎*

1. はしがき

化合物は案外多数あるのではないと思われる。

爆発性であるとは思われていないが、実は爆発する

コバルト錯塩は分子内にニトロ基、硝酸基、過塩素

Table 1 Typical complex salts of cobalt and chromium

Formula	Decomposition product	Molecular weight	Specific volume 1/100g	Oxygen balance g/100g
[Co(NH ₃) ₆](NO ₃) ₃	CoO+9N+8H ₂ O+H ₂	346	87.5	-4.62
[Co(NH ₃) ₆](ClO ₄) ₃	CoO+6N+9H ₂ O+2O+3Cl	459	70.8	6.98*
[Coen ₃](ClC ₄) ₃	CoO+6N+11H ₂ O+3Cl+6C+H ₂	537	68.8	-38.7*
[Co(NH ₃) ₅ (ONO ₂)](NO ₃) ₂	CoO+8N+7H ₂ O+1/2H ₂	330	83.2	7.27
[Coen ₂ (NO ₂) ₂]NO ₂	CoO+7N+5H ₂ O+3H ₂ +4C	316	81.6	-55.7
[Co(NH ₃) ₄ (NO ₂) ₂]NO ₃	CoO+7N+6H ₂ O	280	76.0	0.0
NH ₄ [Co(NH ₃) ₄ (NO ₂) ₂]	CoO+7N+5H ₂ O+2O	294	72.4	10.9
Co(NH ₃) ₅ (NO ₂) ₂	CoO+6N+4.5H ₂ O+0.5O	247	70.4	3.24
Co(NH ₃) ₅ (NO ₃) ₂	CoO+6N+4.5H ₂ O+3.5O	295	70.3	19.0
[Cr(NH ₃) ₆](NO ₃) ₃	1/2Cr ₂ O ₃ +9N+7.5H ₂ O+3H	340	89.0	-7.06
[Cr(NH ₃) ₆](ClO ₄) ₃	1/2Cr ₂ O ₃ +6N+9H ₂ O+1.5O+3Cl	453	70.4	5.30*
[Cren ₃](NO ₃) ₃	1/2Cr ₂ O ₃ +9N+7.5H ₂ O+9H+6C	418	88.4	-63.2
[Cren ₃](ClO ₄) ₃	1/2Cr ₂ O ₃ +6N+10.5H ₂ O+3H+3Cl+6C	531	69.6	-40.7*
[(NH ₃) ₅ -Co-O ₂ -Co-(NH ₃) ₅](NO ₃) ₃	2CoO+15N+15H ₂ O	628	80.2	0.0
[Co(NH ₃) ₅ (NO ₂) ₂]NH ₄ ·H ₂ O	CoO+7N+6H ₂ O+2O	312	75.5	10.3
[Co(NO ₂) ₆](NH ₄) ₂	CoO+9N+6H ₂ O+5O	388	75.0	20.6

(*) Oxidizability of free chlorine is neglected.